

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Spolupráce energetické a trakční napájecí soustavy

Cooperation of Electric Railways with Power Supply System

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Hodina**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Spolupráce energetické a trakční napájecí soustavy**
Cooperation of Electric Railways with Power Supply System

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Nepříznivé vlivy elektrické vozby na napájecí soustavu
3. Měření ve vybrané transformovně
4. Vyhodnocení měření
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TU Ostrava 2001, ISBN 80-78-791-0
[2] Biesenack, H.; Hofmann, G. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen, B.G. Taubner Verlag Wiesbaden 2006, ISBN 13 978-3-519-06249-3
[3] Rusek, S.: Teoretická elektroenergetika, VŠB-TU Ostrava 1999
[4] ČSN EN 5 160 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě (platná od 2000) a související normy a předpisy


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne.....

Podpis.....

Rád bych zde vyjádřil poděkování prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc. a Ing. Václavu Kolářovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce.

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o vzájemné spolupráci trakční a napájecí soustavy. V teoretické části jsou popsány druhy trakce používané v České republice, jejich způsob napájení a rozdělení. Dále je pak postupně rozepsán problém usměrňovačů používaných v trakčních vozidlech. Jejich vliv na napájecí síť v podobě harmonických napětí. Tento problém je rozebrán z hlediska důsledku těchto usměrňovačů a možnosti odstranění jejich nežádoucích vlivů na napájecí síť. Součástí diplomové práce je také vyhodnocení měření z trakční napájecí stanice Svitavy.

Klíčová slova:

Harmonické napětí, usměrňovač, činitel harmonického zkreslení, elektrická trakce.

Abstrakt:

The thesis deals with mutual support traction and power supply system. The teoretical part describes the type of traction used in the Czech Republic, their mode of supply and distribution. I is gradually itemized the problem of rectifiers used for traction vehicles. Thein influence on the power network in the form of harmonic voltage. This issue is discussed in term sof rectifying the result of removing the posibility of thein averse effects on power system. The thesis is the evaluation of the measurment of substations Svitavy.

Key words:

Harmonic voltage, rectifier, total harmonic distoration, electric traction

Seznam použitých zkratek:

AC – střídavé napětí [V]
Atd – a tak dale
CFL – typ kompaktního svítidla
ČD – české dráhy
ČR – Česká republika
ČSN – Česká státní norma
D – zapojení do trojúhelníka
DC – stejnosměrné napětí [V]
DYn – Zapojení transformátoru primární vinuti do trojúhelníka sekundární do hvězdy
s vyvedeným nulovým bodem
EMC – electromagnetic compatibility
EN – evropská norma
ETD – a podobně
Event. – eventuelně
EU – Evropská unie
I – Proud [A]
MHD – městská hromadná doprava
MTN – měřicí transformátor napětí
MTP – měřicí transformátor proudu
Obr – obrázek
PPC – point of common coupling
Resp. – respective
SF6 – hexafluorid síry
s.r.o – společnost s ručením omezeným
THD – total harmonic distortion
TMR – trakční měnírna
TNS – trakční napájecí stanice
TR – transformátor
TT – trakční transformovna
tj – to jest
U – napětí [V]
UPS – Uninterruptible power supply
USB – universal serial bus
Y – zapojení do hvězdy
3f – třífázový
 Ω – ohm
% - procento

Obsah:

Úvod	1
1. Trakční síť	3
1.2 Přehled tratí v ČR:	3
1.3 Stejnoseměrná trolej	4
1.4 Střídavá trolej	5
1.5 Způsoby napájení trakční sítě	5
1.5.1 Jednostranné napájení	6
1.5.2 Dvoustranné napájení	6
1.5.3 Čtyřstranné napájení	7
2. Distribuční síť	8
2.1 Kritéria kvality energie ČSN EN 50160	8
2.2 Charakteristiky dodávky elektrické energie vysokým napětím	8
2.2.1 Harmonické napětí	9
2.2.2 Meziharmonické napětí	10
2.2.3 Činitel harmonického zkreslení THD	10
2.3 Základní definice a vztahy pro neharmonické veličiny	10
3. Spolupráce trakční a napájecí distribuční sítě	14
3.1 Příčiny deformace síťového napětí	14
3.2 Spotřebiče generující vyšší harmonické	16
3.3 Popis dvanáctipulzního usměrňovače	18
3.4 Nežádoucí Vedlejší účinky	19
3.4.1 Snížení Zpětného působení do sítě	20
3.4.2 Omezování vyšších harmonických	20
3.4.3 Možnosti snižování harmonických	22
3.5 Elektromagnetická kompatibilita vůči napájecí soustavě	24
3.6 Nesymetrie při napájení jednofázových drah	25
4. Měření	27
4.1 Popis měřené trati:	27
4.2 Popis TNS:	27
4.3 Popis měření:	29
4.4 Schéma zapojení:	30
4.5 Schéma měření:	30
4.6 Popis měřících přístrojů:	31
4.5.1 Popis měřícího programu	31
4.6 Grafy ze změřených hodnot	33
Závěr:	41
Obrázek 1 - Trakční síť ČR	3
Obrázek 2 - Schéma jednostranného napájení	6
Obrázek 3 - Schéma dvoustranného napájení	7
Obrázek 4 - Schéma čtyřstranného napájení	7

Obrázek 5 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u jednofázového usměrňovače.....	14
Obrázek 6 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u šestipulzního usměrňovače.....	15
Obrázek 7 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u dvanáctipulzního usměrňovače.....	15
Obrázek 8 - Spektrum harmonických generovaných počítačem.....	17
Obrázek 9 - Spektrum harmonických generovaných uspornou žárovkou	18
Obrázek 10 - Schéma dvanáctipulsního usměrňovače	19
Obrázek 11 - Odběr proudu usměrňovače B6	20
Obrázek 12 - Spektrum odebíraného proudu - nefiltrovaná zátěž	21
Obrázek 13 - Spektrum harmonických po aplikaci aktivního filtru.....	21
Obrázek 14 - Kombinace paralelního a sériového filtru	22
Obrázek 15 - Odběr usměrňovače B2	23
Obrázek 16 - Poměr ceny k výkonu jednotlivých řešení pro snížení harmonických proudů... ..	23
Obrázek 17 - Filtry harmonických v TNS Svitavy	24
Obrázek 18 - Pohled na přívod do TNS 110kV	28
Obrázek 19 - Zapouzdražený rozvaděč TT Svitavy	28
Obrázek 20 - Schéma zapojení.....	30
Obrázek 21 - Schéma měření	30
Obrázek 22 - Měřicí stanoviště 1 110kV	32
Obrázek 23 - Měřicí stanoviště 2 hladina 27kV	32
Obrázek 24 - Graf průběhu sdruženého napětí na vn straně transformatoru 110/27kV	33
Obrázek 25 - Průběhy THD v dni 2.3.2011	34
Obrázek 26 - Kontrola jednotlivých harmonických dle PPDS	35
Obrázek 27 – Činitel THDI po dobu celého měření	36
Obrázek 28 - Ukázka podmínky pro THDI.....	37
Obrázek 29 - Srovnání maximálních hodnot harmonických proudu dle amplitudového zákona a skutečně naměřených hodnot	38
Obrázek 30 – Korelace	39
Obrázek 31 – Korelace (průběh)	40
 Tabulka 1 - Tabulka požadovaných parametrů distribučních sítí	8
Tabulka 2 - Hodnoty jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_c pro řady harmonických až do 25	9
Tabulka 3 - Maximální amplitudy dle PPDS	35
Tabulka 4 - Porovnání hodnot THDI dle jednotlivých kritérií.....	39
Tabulka 5 - Korelační koeficient.....	40

Úvod

Důsledkem technologického rozvoje v oblasti elektroniky je i rostoucí zatížení rozvodných sítí harmonickými. To je způsobeno stále více a více používáním elektronických součástek s měniči frekvence. U menších výkonů mohou generovat harmonické nejčastěji: počítače monitory síťové adaptéry. U vyšších výkonů to pak jsou měniče frekvence a zdroje nepřerušitelného napájení UPS.^[1]

Velkým problémem EMC u nelineárních spotřebičů je právě jejich zpětné působení na napájecí síť a její zatěžování právě harmonickými. Toto se týká hlavně statických měničů jakožto nejrozšířenějšího nelineárního spotřebiče v současné době. A právě tyto měniče jsou nejčastěji zdrojem harmonických. Můžeme je tedy pokládat za generátory proudových harmonických. Z definice generátoru proudových harmonických pak vyplývá, že generátory tohoto typu dodávají do napájecí sítě proudové harmonické nezávisle na vstupní impedanci této sítě.^[2] Pro ČR kde je používána základní frekvence 50Hz pak obvykle vznikají kmitočty s frekvencemi 150, 250, 350. Tj. je můžeme označovat jako 3, 5 a 7 harmonická. Pokud uvažujeme pouze užití jednotlivých spotřebičů nejsou účinky na síť nijak zvláště velké, ale uvažíme-li více těchto spotřebičů tak pak jejich impedance již znatelně ovlivní napětí v síti. V následujících letech, postupně s technologickým vývoje se tato situace bude stále zhoršovat v jistých mezích. Pro projektanty i provozovatele pak vzniká povinnost udržovat tyto odchylky v co nejmenší míře. Tyto meze jsou dány normami EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-4, tyto normy popisují mezní hodnoty síťového napětí ve veřejných i průmyslových sítích. Dále pak EN 61000-3-2, EN 61000-3-12 které pojednávají o účinnu sítě na připojená zařízení.^[1]

Pokud se zaměříme na generátory harmonických v oblasti trakce, lze za tyto generátory považovat především elektrická hnací vozidla jednofázové soustavy. Která obsahují diodový měnič trakčního obvodu v soustavě 25kV, 50Hz. Stejný charakter vykazují trakční usměrňovače napájecích stanic soustavy 3 kV DC, a to vůči napájecí síti 22 kV, 50 Hz.^[2]

Jako příklad můžeme uvažovat elektrické hnací vozidlo s diodovým trakčním usměrňovačem, které ve svém odebíraném proudu vykazuje všechny liché násobky základní frekvence 50Hz. Oproti tomu když uvažujeme trakční usměrňovač nelze automaticky tvrdit, že generuje všechny liché násobky základní harmonické, ale vykazuje ty jejichž frekvence závisí na schématu konkrétního usměrňovače. Usměrňovač v šestipulzním schématu (MHD) má vůči napájecí síti charakter proudového generátoru lichých harmonických s následujícími řádovými čísly:

5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., atd.

zatím co usměrňovač ve dvanáctipulzním schématu (ČD) má vůči napájecí síti charakter proudového generátoru s omezeným spektrem daným řádovými čísly:

11., 13., 23., 25., atd.

^[1] Paraf. - Ing. Viktor Hašpl

^[2] Paraf. – Jiří Krupica

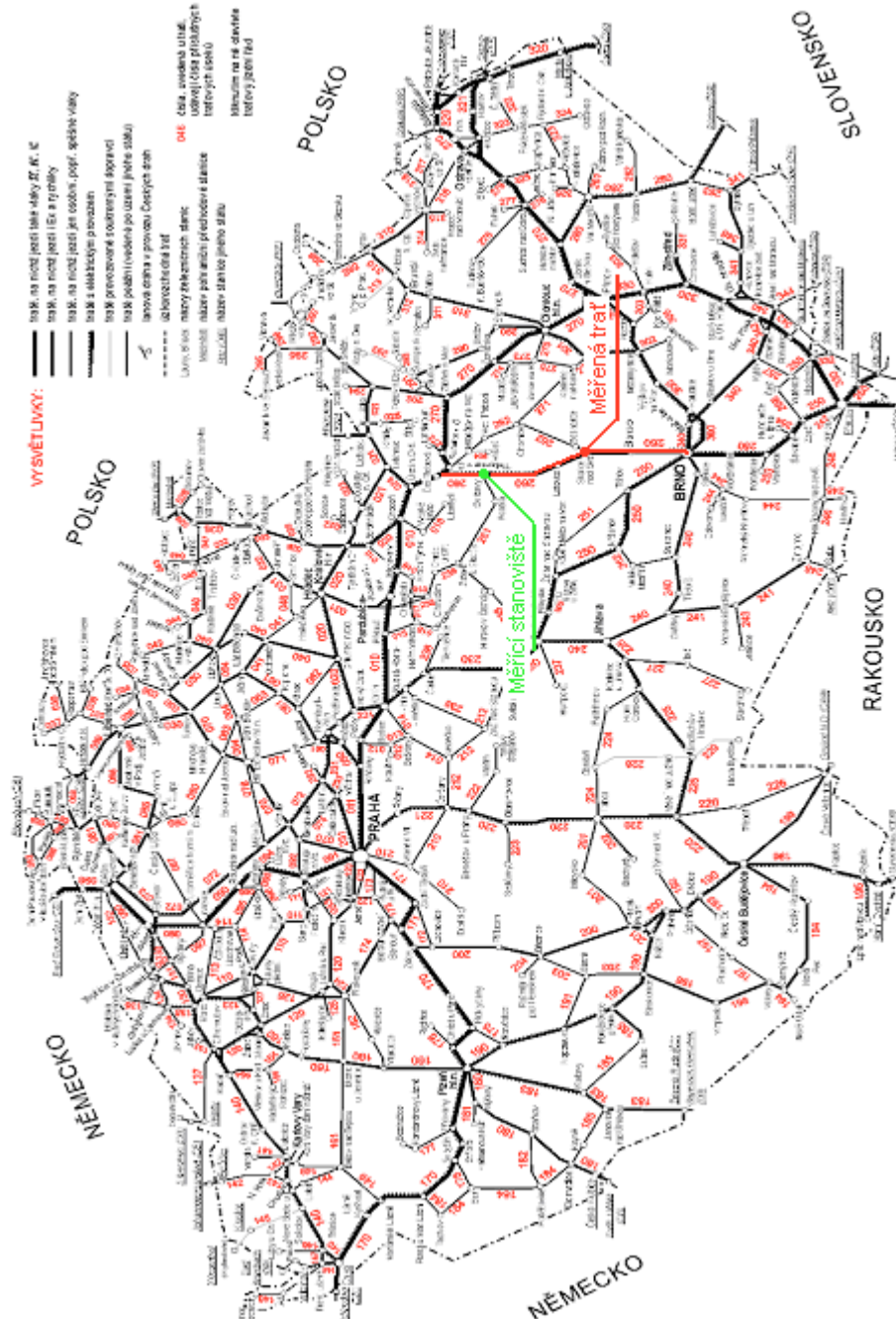
Jakožto přenosová síť tak i kompenzační zařízení spolu s transformátory jsou nejčastěji přepočítány na frekvenci sítě tj. 50Hz a na tuto frekvenci i dimenzovány. Pokud uvažujeme vysokofrekvenční podíly které nám zastupují vyšší harmonické, lze říci, že náklady těchto zařízení pak velmi stoupají. Tímto rozumíme vyšší pořizovací náklady na elektrickou energii, větší ztráty na přenosových cestách, zvýšené náklady kvůli většímu zatížení jalovým výkonem a nutnost předimenzování komponent a částí zařízení jsou jen některé z nich. Z tohoto vyplývá i další problém a to ten, že se kvůli těmto zařízením mohou přehřát a vypadnout. Velmi důležitým faktorem je i tvrdost sítě (stabilita). Čím je síť tvrdší o to menší budou mít vliv harmonické proudy na napětí.^[2]

Z tohoto důvodu je nutné zabránit jak v generování tak i šíření vyšších harmonických v elektrických sítích. Nejčastěji k odstranění popř. snížení harmonických používáme velmi často indukčnosti v podobě tlumivky, nebo alternativou jsou také pasivní filtry.

Důsledkem této práce sem se snažil vysvětlit problematiku spolupráce napájecí energetické sítě s trakční soustavou z hlediska harmonických, jak už jejich vzniku tak i možností jejich odstranění aby došlo ke zlepšení poměru v napájecí síti.

^[2] Paraf. - Jiří Krupica

1.2 Přehled tratí v ČR:



- 3 -

1.3 Stejnosměrná trolej

Za historicky nejstarší lze považovat napájení elektrické trakce pomocí stejnosměrného proudu. Jak se zdokanalovala technika, zvyšovaly se i vzdálenosti trakčních úseků a hladina napětí z důvodů požadavků na výkon trakčních vozidel. V současné době jsou nejčastěji používána následující napětí:

- 600V nebo 750V pro vozidla MHD
- 1500V pro městské rychlodráhy a železnice
- 3000V pro hlavní dráhy

Hlavním omezujícím faktorem při zvyšování napětí byly možnosti použitých motorů. Používali se stejnosměrné komutátorové motory, které pro potřebné výkony nelze hospodárně stavět s napětím na komutátoru větším než asi 1,5kV. Při užití trolejového napětí 3kV se spojují dva motory do série.^[3]

Trolejové napětí kolísá nejméně -30...+20%, u MHD často daleko více a závisí:

- na délce napájeného úseku
- na způsobu napájení (jedno nebo oboustranné)
- na konstrukci (průřezu, sestavě) trolejového vedení
- na zatížení, jeho kolísání a případném použití rekuperačního brzdění.

Jako zdroje napětí se užívají měničny, které byly napájené z 3f sítě. Pro městskou dopravu jsou to sítě 22kV napájené přes šestipulzní můstkové usměrňovače. A pro Trakci jsou napájeny z hladiny 110kV přes speciální měničové transformátory s dvanáctipulzními usměrňovači. Napětí proto obsahuje malou střídavou složku s kmitočtem 300Hz. resp. 600Hz.^[3]

Náhradní schéma napájecího obvodu pro železnice obsahuje především:

- Ohmický odpor v závislosti na provedení v mezích asi 0,06...0,09Ω/km
- Indukčnost tlumivky v napájecí v měničce asi 4mH na 1 napájecí jednotku
- indukčnost vedení asi 0,75...1,0mH/km
- kapacitu vedení asi 20nF/km
- svod asi 85kΩ/km

Velikost odporu troleje má vliv na kolísání napětí při odběru a na velikost zkratových proudů, indukčnost na strmou náhradu zkratových proudů a na nároky na jejich vypínání v měničce nebo na vozidle. Kapacita spolu s indukčností rozhoduje o rezonančních a vlnových jevech na vedení.^[3]

^[3] Doc. Ing. Jiří Danzer CSc.

1.4 Střídavá trolej

Při užití střídavého napájení je možno použít vyšších napětí a tím je umožněn i přenos vyšších výkonů při menších proudech tekoucích vedením s menšími ztrátami. Střídavou trolej lze nalézt pouze výhradně u trakce. Nevýhodou je nutnost transformátoru v trakčním vozidle, čímž výrazně vzroste jeho váha. Na druhé straně však umožňuje optimální volbu napětí motoru a použití jeho hospodárné regulace i při stupňové regulaci napětí.^[3]

Nejrozšířenější soustavy:

-15kV 16 2/3 Hz, která byla zavedena počátkem 20. století pro první rozsáhlé elektrifikované železnice v Německu, Švýcarsku, Rakousku a ve Skandinávii. Snížený kmitočet si vynutily vlastnosti střídavého komutátorového trakčního motoru (vznik transformačního napětí a v důsledku toho zhoršená komutace), který byl výhradně používán.^[3]

-25kV, 50Hz (event. 60Hz v USA a částečně v Japonsku), jejíž prudký rozvoj souvisí se začátkem výroby křemíkových diod v 60. letech. Kolísání napětí se povoluje -30 až +16...+20%, někdy pouze po omezenou dobu. Pro napájení troleje se sníženým kmitočtem bylo nutno použít rotační soustrojí nebo přímo jednofázové generátory (nyní polovodičové měniče) a vlastní drážní rozvod. V době, kdy všeužitečná síť svým výkonem stejně potřebám železnic nepostačovala to nebylo považováno za zásadní nedostatek.^[3]

Hlavní parametry střídavé napájecí stanice a troleje 25kV:

- poměrná reaktance napájecího transformátoru 9,5% při 10/13,5MVA, 27,5kV
- indukčnost vedení asi 1mH/km
- kapacita vedení asi 15...20nF/km
- svod vedení asi 2,7MΩ/km
- vlnová impedance asi 190...200Ω

1.5 Způsoby napájení trakční sítě

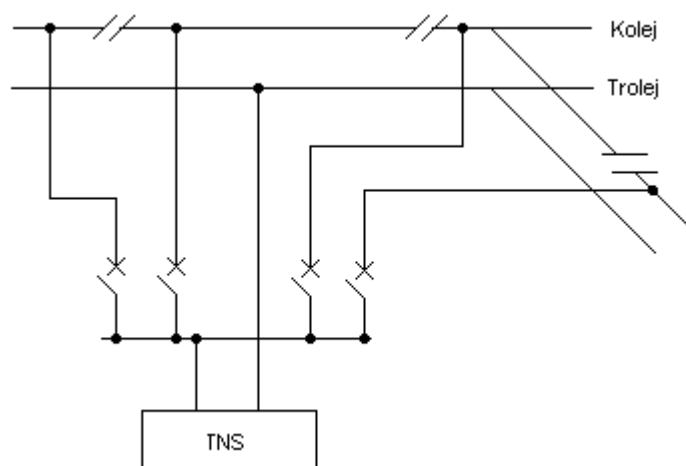
Trakční síť je napájena trakčním proudem z trakčních napájecích stanic. Trakční síť se dělí na napájecí úseky za účelem omezení velikostí lokalizace poruch a k omezení velikostí napájecích proudů. Tyto napájecí úseky jsou od sebe izolovány a napájeny odděleně. Podle způsobu napájení jednotlivých napájecích úseků rozeznáváme tyto způsoby napájení:

^[3] Doc. Ing. Jiří Danzer CSc

- Jednostranné napájení
- Dvoustranné napájení
- Dvoustranně rozložené napájení dvoukolejné tratě
- Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínacími stanicemi^[4]

1.5.1 Jednostranné napájení

Toto napájení se nejčastěji užívá u městských drah, lze ho provést jako soustředěné nebo rozložené. Soustředěné znamená, že elektrický proud je přiváděn pomocí kabelového vedení z jedné napájecí stanice do několika napájecích úseků. Rozložené naopak napájí pouze dva sousední úseky. Tento způsob je využíván téměř u všech elektrických střídavých trakčních drah.^[4]

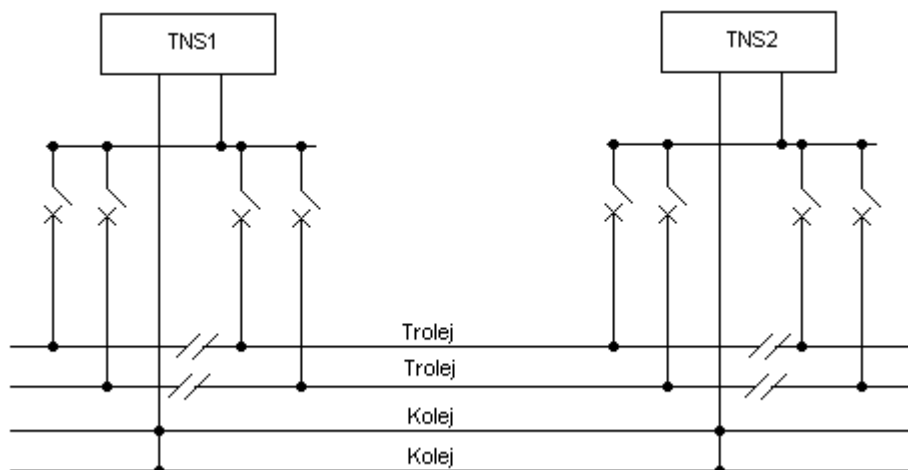


Obrázek 2 - Schéma jednostranného napájení

1.5.2 Dvoustranné napájení

Při dvoustranném zapojení napájíme pravé a levé koleje odděleně, proto je zde velká výhoda provedení výluky napájení jedné koleje při opravách nebo poruchách. Také se v tomto systému napájení lépe lokalizují poruchy.^[4]

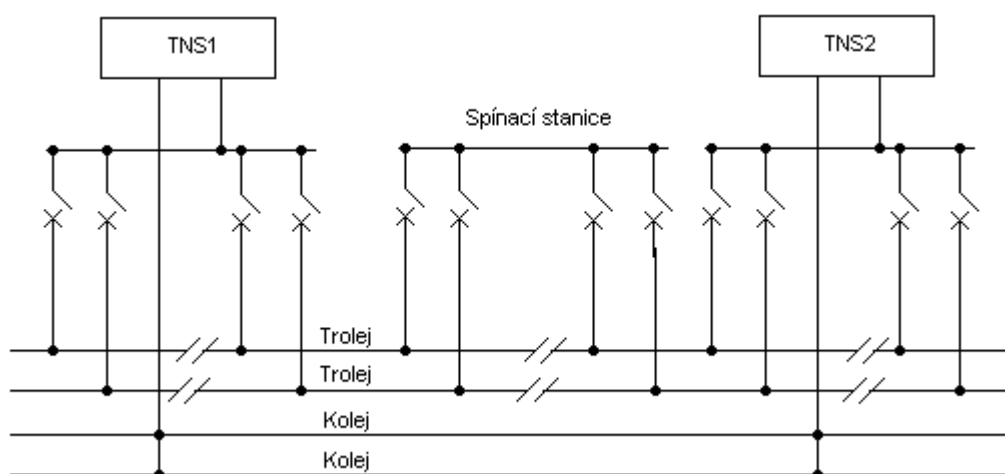
^[4] Paraf. - Děrgel, I



Obrázek 3 - Schéma dvoustranného napájení

1.5.3 Čtyřstranné napájení

Toto napájení se provádí pomocí úsekového děliče, který je umístěn mezi dvěma stanicemi. Spínací stanice pak umožňuje vzájemné propojení všech částí trolejového vedení v daném úseku. Z topologického hlediska pak plyne, že ke každému místu teče proud čtyřmi cestami. Pokud máme velmi vytíženou trať lez mezi napájecí stanice umístit i více spínacích stanic. Výhodou pak je zvětšení vodivého průřezu a snížení úbytku napětí. Výhodou tohoto napájení je možnost vyřadit z provozu jen vedení na jedné polovině délky úseku a na jedné koleji při poruše.^[4]



Obrázek 4 - Schéma čtyřstranného napájení

^[4] Paraf. - Děrgel, I

2. Distribuční síť

2.1 Kritéria kvality energie ČSN EN 50160

ČSN EN 50160 Tato norma je českou verzí evropské normy EN 50160:1999. Evropská norma EN 50160:1999 má status české technické normy. Norma uvádí hlavní charakteristiky napětí v místech připojení odběratelů z veřejných distribučních sítí nízkého a vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Norma udává meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv odběratel, nepopisuje typickou situaci pro odběratele připojeného na veřejnou distribuční síť. Předmětem této normy je definování a popis charakteristik napájecího napětí týkající se: - kmitočtu, - velikosti, - tvaru vlny, - symetrie třífázových napětí. Během normálního provozu sítě vyvolávají změny zatížení, rušení způsobená nějakým zařízením i výskyt poruch, převážně způsobených vnějšími vlivy, změny těchto charakteristik. Charakteristiky se mění způsobem, který je pro jakékoliv předávací místo náhodný v čase a pro jakýkoliv časový okamžik náhodný co do místa. S ohledem na tyto vlastnosti lze očekávat, že úroveň charakteristik mohou být v malém počtu případů překročeny. Některé jevy, které ovlivňují napětí, jsou výslovně nepředvídatelné tak, že je nemožné dát u příslušných charakteristik určité hodnoty.^[7]

2.2 Charakteristiky dodávky elektrické energie vysokým napětím

V kapitole 2.2 je citována norma ČSN EN 50 160 [5]

Uživatelům, jejichž požadavky překračují přenosové sítě nn, je dodávka zpravidla zajištěna druhotným napájecím napětím vyšším než 1kV. Norma ČSN EN 50 160 se vztahuje na takovéto dodávky elektrické energie při druhotném napětí až do 35kV včetně.

Tabulka 1 - Tabulka požadovaných parametrů distribučních sítí

Parametr napětí v síti	Kritérium kvality dle ČSN EN 50160
Frekvence	a) propojené systémy 50 Hz $\pm 1\%$ během 99,5% roku 50 Hz $+4\%/-6\%$ neustále b) ostrovní systémy 50 Hz $\pm 2\%$ během 95% týdne 50 Hz $\pm 15\%$ neustále
Velikost napětí	$U_n = 230 \text{ V}$ v soustavách nn
Kolísání napětí kolem jmenovité hodnoty U_n	$U_n \pm 10\%$ pro 95% průměrných efektivních hodnot určených z měřících intervalů 10

^[7] TOPINFO

	minut během každého týdne Un +10%/-15% pro všechny průměrné efektivní hodnoty určené z měřicích intervalů 10 min
Rychlé změny napětí do 10% Un (velikost, míra vjemu blikání . flickr)	Dlouhodobý flickr Plt £ 1 ve v. ech 3 fázích pro 95% měření během týdne
Krátkodobé poklesy napětí mezi 90% a 1% Un (trvání 1 ms . 1 min)	Není kritérium, pouze směrné hodnoty
Krátkodobé nebo dlouhodobé výpadky napětí	Není kritérium, pouze směrné hodnoty
Přechodná přepětí vlivem atmosférických jevů a dočasná přepětí vlivem poruch v síti	Není kritérium, pouze směrné hodnoty
Velikost harmonických i mezipharmonických napětí a celkový činitel zkreslení (THD)	Úroveň harmonických napětí v % Un dle tabulkových hodnot ČSN EN 50160, THD £ 8% pro 95% měření ve 3 fázích
Nesymetrie napětí	Zpětná složka napájecího napětí £ 2% sousledné složky pro 95% středních efektivních hodnot určených z měřicích intervalů 10 minut během každého týdne
Napěťové úrovně signálu v napájecím napětí	V rozmezí 9% -1% Un pro nosné kmitočty signálu 0,1 - 100 kHz po 99% dne

Pro tabulku byla použito hodnot z materiálů Kritéria kvality energie [6]

2.2.1 Harmonické napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotě uvedené v následující tabulce. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší. Mimoto celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo rovný 8%.

Tabulka 2 - Hodnoty jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_c pro řady harmonických až do 25

Liché harmonické				Sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí (U _c)	řád harmonické h	harmonické napětí (U _c)	řád harmonické h	harmonické napětí (U _c)
5	6,0%	3	5,0%	2	2%
7	5,0%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%		
13	3,0%	21	0,5%		

17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

2.2.2 Meziharmonické napětí

S rozvojem měničů kmitočtu s podobných zařízení hladina meziharmonických narůstá. Hodnoty se v současné době studují a získávají další zkušenosti. V určitých případech způsobí meziharmonické i nízkých úrovní flickr nebo rušení v systémech hromadného dálkového ovládání.

2.2.3 Činitel harmonického zkreslení THD

Činitel harmonického zkreslení THD nám vyjadřuje míru zkreslení signálu. THD se obvykle udává v %. Pro čistý harmonický (sinusový) signál je THD=0%. THD je definováno poměrem výkonu vyšších harmonických ku výkonu první harmonické.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Kde: U_i jsou efektivní hodnoty jednotlivých harmonických
 U_1 je efektivní hodnota první (základní) harmonické

2.3 Základní definice a vztahy pro neharmonické veličiny

V kapitole 2.3 jsem citoval odbornou literaturu vypůjčenou od prof. Ing. Josefa Palečka CSc. [8], která nejvíce odborně popisuje problematiku použitou pro tuto kapitolu, myslím si že parafrázování by tu nebylo namístě.

Základní harmonická (složka) – složka členu 1. řádu Fourierova rozvoje periodické veličiny. Základní harmonická elektrické sítě je 50Hz.

Harmonická (složka) – složka vyššího řádu než 1. řádu Fourierova rozvoje periodické veličiny.

Řád harmonické (n) – celé číslo dané poměrem frekvence harmonické a základní harmonické složky.

Subharmonická – řád harmonické menší než 1.

Hyperharmonická – řád harmonické větší než 1.

Charakteristická harmonická – harmonická složka řádu $n = k \cdot p \pm 1$ kde p je počet impulsů a k je libovolné přirozené číslo (u usměrňovačů).

Necharakteristická harmonická – ostatní harmonické.^[8]

Nesinusové průběhy proudu $i(t)$ a napětí $u(t)$ rozkládáme na řadu sinusových průběhů pomocí Fourierova teorému, na základě kterého periodickou neharmonickou funkci splňující Dirichletovy podmínky umíme rozložit do nekonečné Fourierovy řady.

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_{U,n}) \quad (2)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_{I,n}) \quad (3)$$

Kde: U_0 (I_0) jsou jednosměrné složky napětí (proudu)

U_n (I_n) pro $n = 1, 2, 3, \dots$ jsou efektivní hodnoty jednotlivých harmonických.

$\Phi_{U,n}$ ($\Phi_{I,n}$) jsou fáze vzhledem na periodu n -té harmonické.

Nebo ve tvaru:

$$u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{U,n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=0}^{\infty} B_{U,n} \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{I,n} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=0}^{\infty} B_{I,n} \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) \quad (5)$$

Kde nové konstanty řady pro n -tou harmonickou jsou:

$$A_{U,n} = U_n \cdot \cos \varphi_n \quad (6)$$

$$A_{I,n} = I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (7)$$

$$B_{U,n} = U_n \cdot \sin \varphi_n \quad (8)$$

$$B_{I,n} = I_n \cdot \sin \varphi_n \quad (9)$$

^[8] prof. Ing. Josef Paleček CSc.

Ze předchozích vztahů určíme:

$$U_n = \sqrt{(A_{U,n}^2 + B_{U,n}^2)} \quad (10)$$

$$I_n = \sqrt{(A_{I,n}^2 + B_{I,n}^2)} \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{B_{U,n}}{A_{U,n}} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{B_{I,n}}{A_{I,n}} \quad (13)$$

Pro analytické určení koeficientů Fourierova rozkladu platí:

$$A_{U,n} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \sin n \omega t d \omega t \quad (14)$$

$$A_{I,n} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \sin n \omega t d \omega t \quad (15)$$

$$B_{U,n} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \cos n \omega t d \omega t \quad (16)$$

$$B_{I,n} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cdot \cos n \omega t d \omega t \quad (17)$$

$$U_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u(\omega t) dt \omega \quad (18)$$

$$I_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\omega t) dt \omega \quad (19)$$

Efektivní hodnota napětí:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n \omega t + \varphi_{U,n}) \right]^2 \cdot dt \omega} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (20)$$

Analogicky efektivní hodnota proudu:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[\sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_{I,n}) \right]^2 \cdot dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad [8] \quad (21)$$

Každá proudová harmonická a její odpovídající napěťová harmonická vytvářejí činnou a jalovou složku výkonu. Činný výkon harmonických neprodukuje užitečnou práci. Například točivé pole harmonických v motoru nevytváří točivý moment i když vytváří ztráty. Činný výkon harmonických je spotřebován ve formě ztrát a podílí se na zahřívání přenosových prvků a vlastních spotřebičů. Pro posouzení deformace křivky proudu nebo napětí, zavádíme tzv. obsah základní harmonické napětí a proudu.

$$g_U = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}} = \frac{U_1}{U} \quad (22)$$

$$g_I = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{I} \quad (23)$$

Kde: $U_1, (I_1)$ je základní harmonická napětí, proudu neharmonického průběhu.

U, I je efektivní hodnota napětí, proudu tohoto průběhu.

Kvalitu napětí a proudu z hlediska harmonického zkreslení udává celkové harmonické zkreslení, neboli THD.

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \quad (24)$$

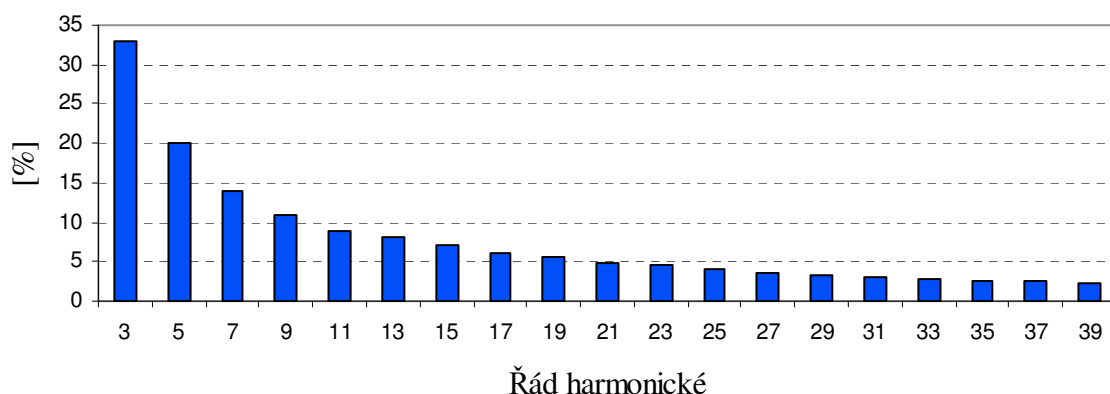
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad [8] \quad (25)$$

^[8] prof. Ing. Josef Paleček CSc.

3. Spolupráce trakční a napájecí distribuční sítě

3.1 Příčiny deformace sít'ového napětí

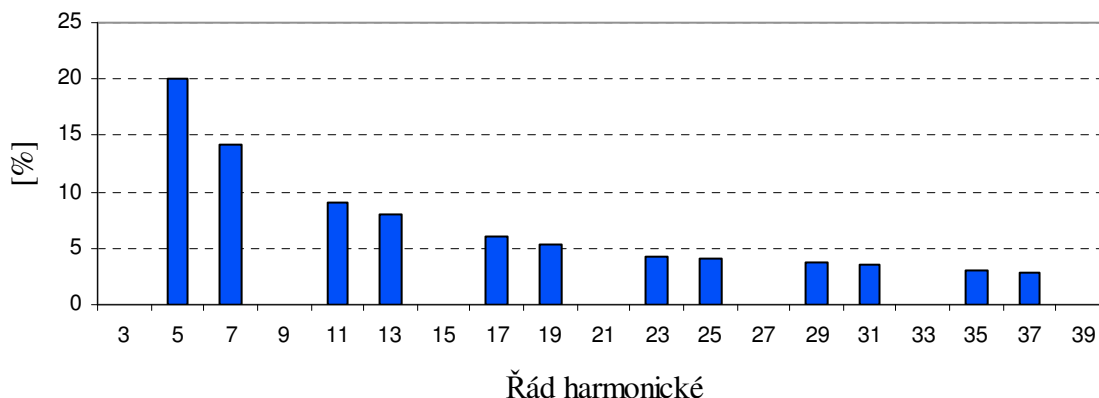
V síti 22kV není nikdy dosaženo ideálního sinusového průběhu. Na vině je právě provoz šestipulzních usměrňovačů, které deformují ideální sinusovou křivku. Tyto usměrňovače bývají obsaženy v měnících popř. v jiných menších odběrech.^[9]



Obrázek 5 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u jednofázového usměrňovače

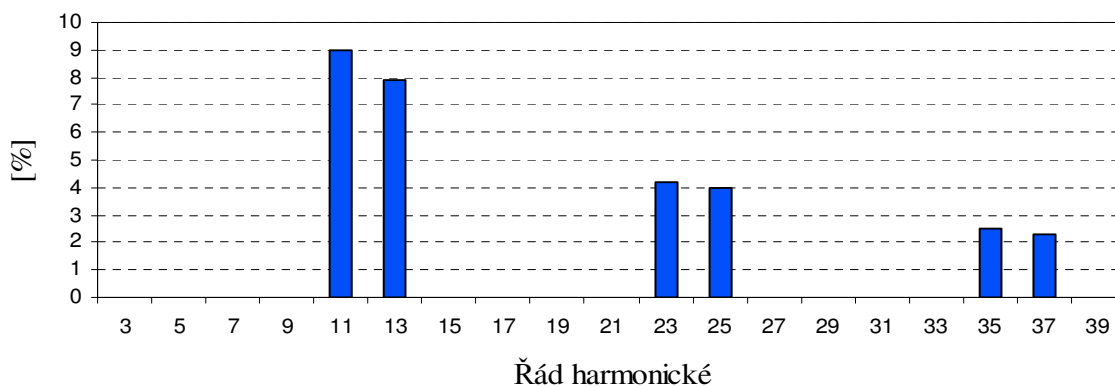
Z obrázku č.6 je patrné, že při použití jednofázového usměrňovače můžeme na straně napájení očekávat všechny liché harmonické. Tyto usměrňovače se dnes hojně používají ve všech spotřebičích obsahující elektroniku, nejvíce pak v pulzních zdrojích a jim podobných zařízeních.^[9]

^[9]Paraf.- Novotný J.



Obrázek 6 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u šestipulzního usměrňovače

U šestipulzního usměrňovače podobně jako u jednofázového usměrňovače můžeme nalézt liché násobky jednotlivých harmonických ovšem kromě harmonických třetího řádu a jeho násobků jak je vidět na teoretické ukázce na obrázku 7. Šestipulzní usměrňovače se nejčastěji používají u trojfázových spotřebičů které pro svou činnost potřebují stejnosměrné napětí. Jako příklad lze uvést třífázové svařovací inventory.^[9]



Obrázek 7 - Ukázka teoretického rozsahu proudových harmonických u dvanátipulzního usměrňovače

U dvanátipulzního usměrňovače lze očekávat pouze harmonické řádu 11 a 13 řádu popř. jejich násobky. Hlavním účelem dvanátipulzního usměrnění je vysoké vyhlazení stejnosměrného napětí požadované spotřebiči. V běžných zařízeních není příliš časté. Nejčastěji se tyto usměrňovače užívají u citlivé elektroniky. Jako další důvod použití lze uvést, že tyto usměrňovače dokáží snížit

^[9] Paraf. Novotný J

emise vyšších harmonických do energetické sítě a to hlavně u velkých odběrů jako jsou frekvenční měniče a velké usměrňovací jednotky.^[9]

V dřívější době představovali největší odběratele el. energie tepelné spotřebiče a tepelné zdroje. Nyní se však k těmto odběrům přidávají spotřebiče s elektronikou. Tyto spotřebiče spolu s požadavkem zvyšování výkonu a rostoucí hustotou rozvodných sítí jsou hlavním důvodem nárůstu rušení v energetice.^[9]

V dnešní době takřka každý spotřebič obsahuje elektroniku, která se v důsledku spotřeby jeví jako nelineární. Jsou to například měniče pro pohony i velkých výkonů, elektrické pece, statické regulátory, zářivky a výbojky, tak i v neposlední řadě drobné spotřebiče s pulzními zdroji. A právě zdroje jsou dnes už převážně řešeny jen jako pulzní. Od klasických se pomalu kvůli jejich nevýhodám upouští. Nesmíme také opomenout na odběry trakčních měničů ať už pro ČD, MHD, metro, doly, apod.^[9]

Důvodem změn charakteru spotřebičů jsou nyní zvýšené odběry jalové složky výkonu a z toho pak plynoucí následky jako např. zvýšení energetických ztrát ve výrobě i rozvodu elektrické energie. Dalším důvodem deformace je i zvýšení ztrát ve spotřebičích a problémy způsobené regulačními prvky, dále pak také snížení výkonu výkonových transformátorů. Další příčinou je nesouměrné zatížení třífázové soustavy jednofázovými odběry jako jsou například trakční napáječky soustavy 25 kV 50 Hz ČD. Následky nesymetrického odběru se mohou projevit rozdílným fázovým napětím a tím i změněnou funkčností třífázových spotřebičů.^[9]

3.2 Spotřebiče generující vyšší harmonické

Harmonické proudy jsou generovány nelineárními zdroji jako například:

Jednofázové

- spínané napájecí zdroje
- elektronické předřadníky kompaktních svítidel
- malé zdroje nepřerušovaného napájení(UPS)

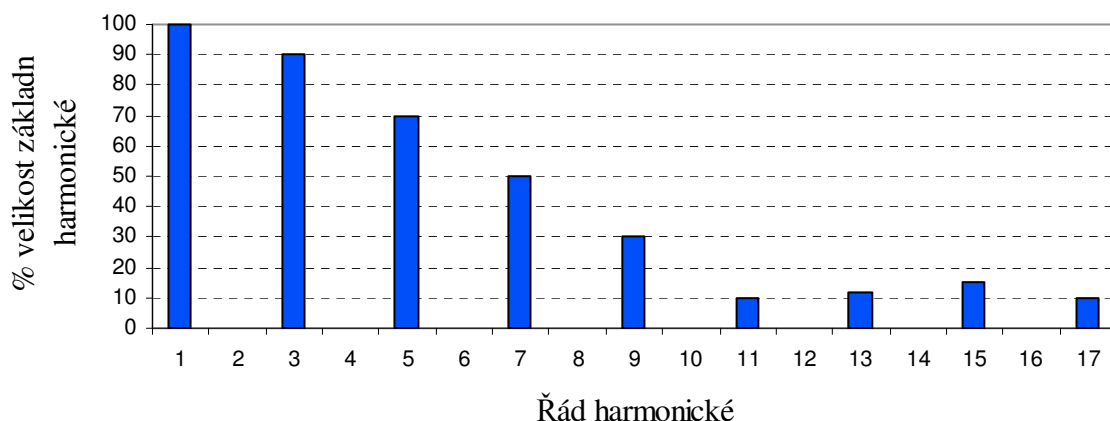
Třífázové

- elektronické regulační pohony
- velké UPS jednotky

Ve všech moderních elektronických přístrojích dnes užíváme pro napájení spínané zdroje. Tyto zdroje mají velkou výhodu v malých rozměrech a tedy i ve zmenšení hmotnosti a ceny oproti klasickému zdroji. Jejich nevýhodou je že se jeví jako nelineární pulsující odběr proudu se s značným

^[9] Paraf. – Novotný J.

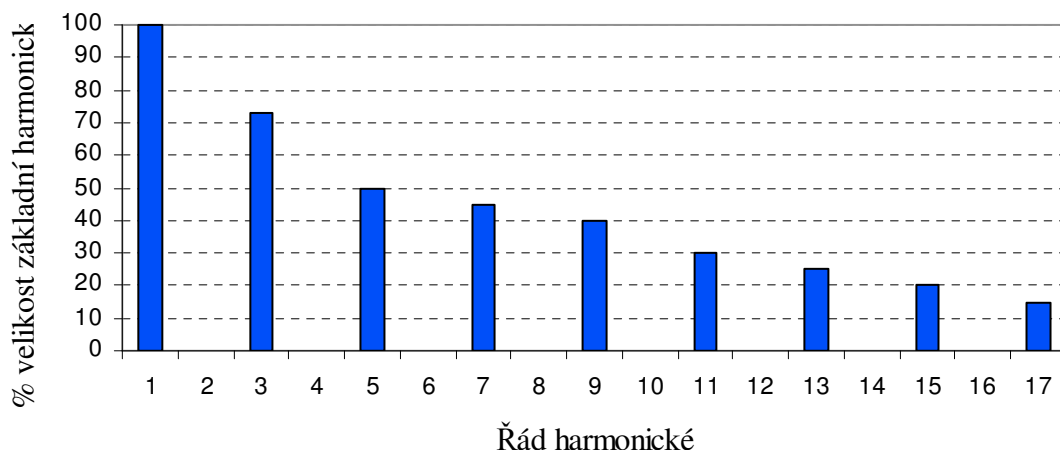
obsahem třetí a dalších vyšších harmonických, jak ukazují obr. 9 a 10. V podstatě stejné chování mají i zmiňované jednofázové UPS. Jako novinky se již objevují zdroje se vstupem s kompenzovaným účinníkem u kterých je cílem učinit odběr proudu jako by se jednalo o odporovou zátěž. Ovšem tato technologie je zatím velmi náročná a pro běžné užití v domácnostech prozatím díky cenové relaci nedostupná.^[9]



Obrázek 8 - Spektrum harmonických generovaných počítačem

S rozmachem moderní techniky a podporou EU jsou dnes klasické žárovkové zdroje užívající wolframové vlákno nahrazovány tzv. CFL kompaktními svítlidly. Elektronický předřadník je umístěn v patci svítidla ve které je umístěna zářivková trubice. Spektrum harmonických odebíraných takovýmto svítlidlem je vyobrazeno na obrázku č. 10. Zde si také můžeme všimnout, že se jedná opět pouze o násobky lichých harmonických. Pokud budeme uvažovat i do budoucna s použitím těchto svítidel, s největší pravděpodobností bude potřeba řešit i jejich problémy, které budou způsobovat distributorovi elektrické energie.^[9]

^[9] Paraf. – Novotný J.



Obrázek 9 - Spektrum harmonických generovaných uspornou žárovkou

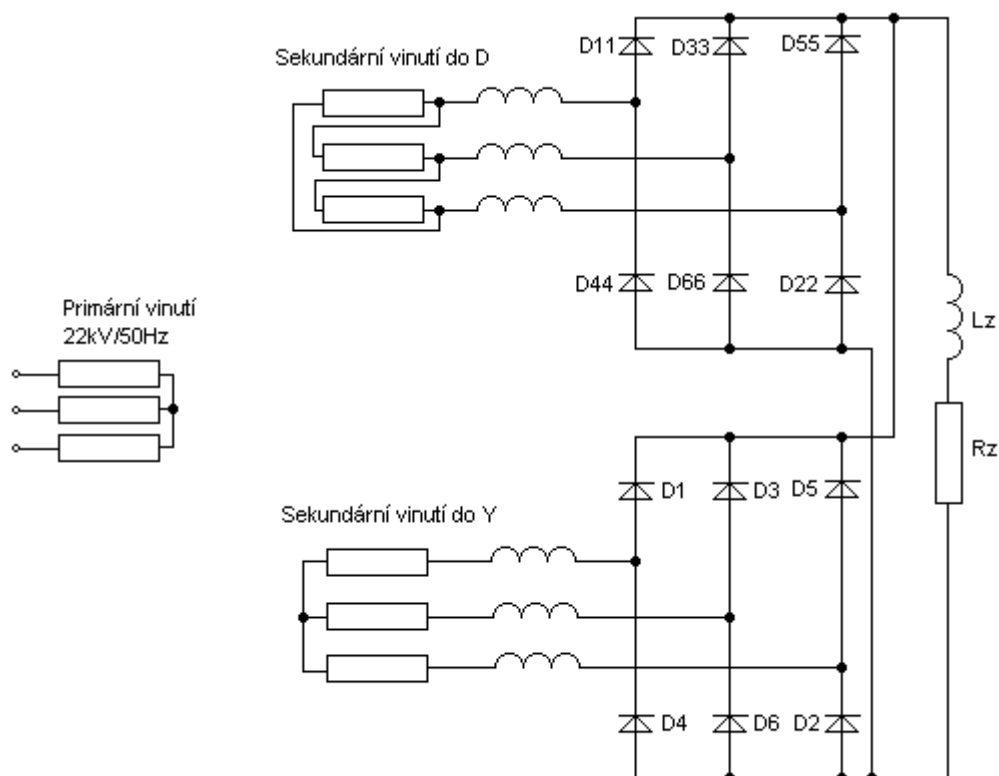
O něco jednodušší je tento problém harmonických u třífázových spotřebičů. U většiny je obsažen třífázový můstkový usměrňovač, kdy tento usměrňovač je zdrojem páté a sedmé harmonické a jejich násobky. Díky tomu jsou vyrušeny některé harmonické frekvence s jejich násobky a rušení v energetické síti je o trochu menší. Pokud ale uvažujeme, že třífázové spotřebiče mají podstatně vyšší odběry nelze mluvit až o tak velkém zmenšení rušení v energetické síti.^[9]

3.3 Popis dvanáctipulzního usměrňovače

„Dvanáctipulzní schéma trakčního usměrňovače se používá od počátku elektrizace československých tratí napětím 3kV, kdy bylo navrženo Ing. Iblem. Dvanáctipulzní usměrňování je výhodné pro menší zvlnění výstupního napětí oproti usměrňování šestipulznímu a také kvůli lepšímu využití sekundárního vinutí transformátoru, kde oběma sekcemi sekundárního vinutí protéká proud dvakrát za periodu napájecího napětí. Velkou výhodou dvanáctipulzního zapojení z hlediska EMC je, že dochází ke generování 5., 7., 17. a 19. harmonické primárního proudu u obou sekcí usměrňovače v protifázi, čímž je dosaženo zanedbatelných hodnot na těchto frekvencích a nejnižší harmonická frekvence na primární straně transformátoru je 550Hz. Dvanáctipulzní usměrňovač (obr. 5) je tvořen dvěma paralelně pracujícími trojfázovými můstkami, z nichž jeden je napájen sekundárním vinutím transformátoru zapojeným do hvězdy a druhý vinutím zapojeným do trojúhelníku. Oba můstky byly v počátcích elektrizace odděleny ještě tzv. nulovou tlumivkou, která zajišťovala oddělení obou částí usměrňovače v době komutace. Podmínkou pro takto paralelně pracující usměrňovače je stejná hodnota sdružených napětí obou sekcí transformátoru (Y,D) přiváděných na vstup usměrňovačů. Další důležitou podmínkou je stejná rozptylová indukčnost obou sekcí usměrňovačového transformátoru.“^[10]

^[9] Paraf. – Novotný J.

^[10] Ladislav Mlynařík



Obrázek 10 - Schéma dvanáctipulsního usměrňovače

3.4 Nežádoucí vedlejší účinky

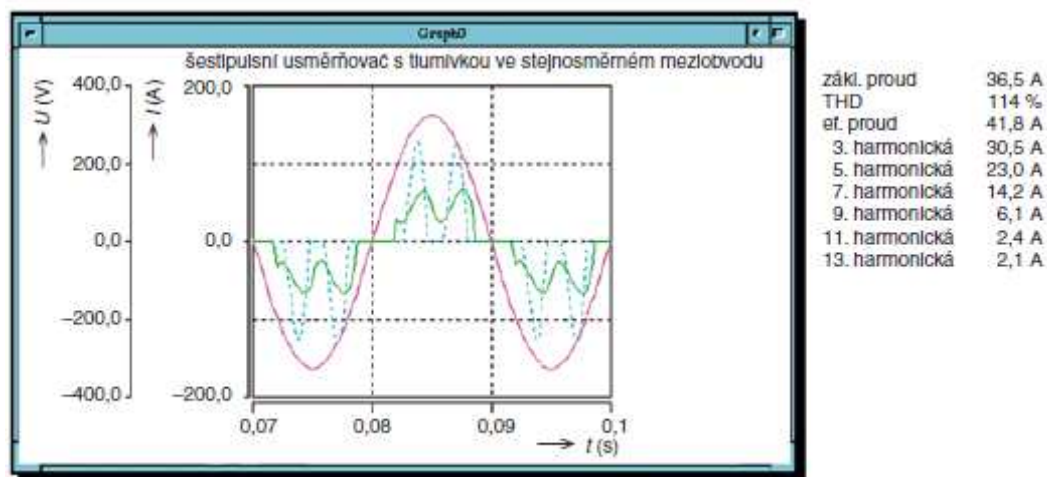
Zpětné působení do napájecí sítě, které generují měniče frekvence mají různý charakter. Charakter působení závisí hlavně na použitém zapojení na vstupu. Na straně sítě lze očekávat celkový obsah harmonických tj. činitel THD – total harmonic distortion (celkové harmonické zkreslení)^[1]

- Jednofázové (dvoupulzní) usměrňovače B2 80-120%
- Třífázové (šestipulzní) usměrňovače B6 80-100%
- Třífázové (dvanáctipulzní) usměrňovače B12 10-15%

Jestliže uvažujeme usměrňovač B2 ,který nejčastěji používáme s kapacitním filtrem pro vyhlazování, který využíváme především pro jednofázové přístroje s výkony asi 2kW, tak u tohoto usměrňovacího obvodu musíme předpokládat jalový proud a všechny liché harmonické. Takovéto

^[1] Paraf. – Ing. Viktor Hašpl

přístroje odebírají zdánlivý proud dvakrát větší, než lze u činného výkonu předpokládat. Usměrnovací obvod B6 s vyhlazováním se používá nejčastěji pro třífázové spotřebiče produkuje ještě další harmonický proud, jehož velikost se hodně blíží činnému proudu.^[1]



Obrázek 11 - Odběr proudu usměrňovače B6

3.4.1 Snížení Zpětného působení do sítě

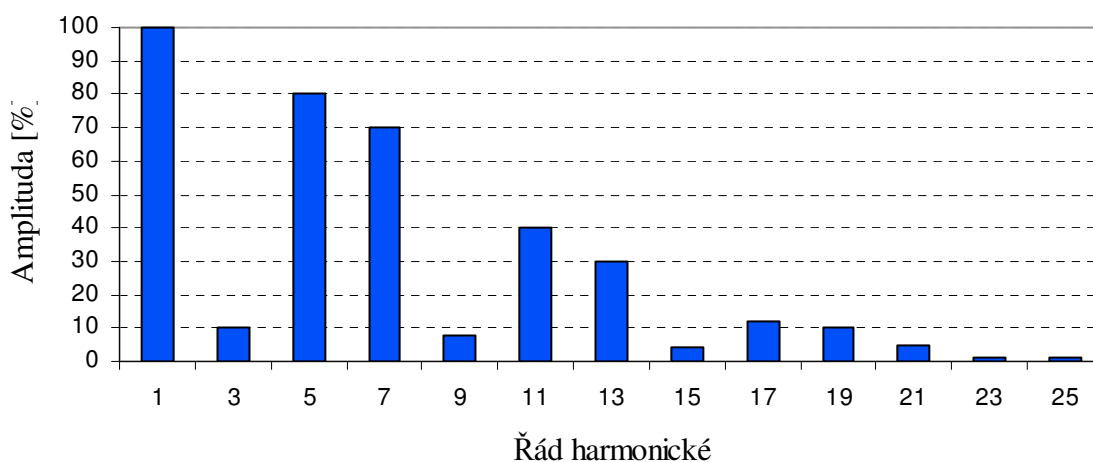
Pokud nechceme příliš zhoršit kvalitu napětí v napájecí síti. Musíme proto zamezit, kompenzovat popř. zmenšit harmonické proudy které nám produkují nesymetrické přístroje. Obecně lze pro toto použít aplikovat různé metody buď individuálně pro každý spotřebič zvlášť nebo pro zařízení jako celek. Musíme uvažovat možnosti užití jednotlivých řešení, nelze říci, že jedno řešení lze aplikovat vždy. K potlačení harmonických proudů z primární strany lze dosáhnout pomocí různých zapojení transformátorů. Jestliže zapojíme transformátor s vinutím DYN5 potlačíme tím všechny harmonické dělitelné třemi v primárním vinutí. U třívíntových transformátorů se zapojením D a Y dokážeme potlačit i 5,7,17,19 atd. harmonickou. Tohoto lze využít i u paralelního zapojení síťových transformátorů. Jestliže pracujeme s vyššími výkony tak často používáme vícepulzní usměrňovače, protože jejich výhodou je, že produkují méně harmonických. Činitel harmonického zkreslení u dvanáctipulzního usměrňovače THD činí asi 8-15%., u osmnáctipulzního usměrňovače asi 4-10%.^[1]

3.4.2 Omezování vyšších harmonických

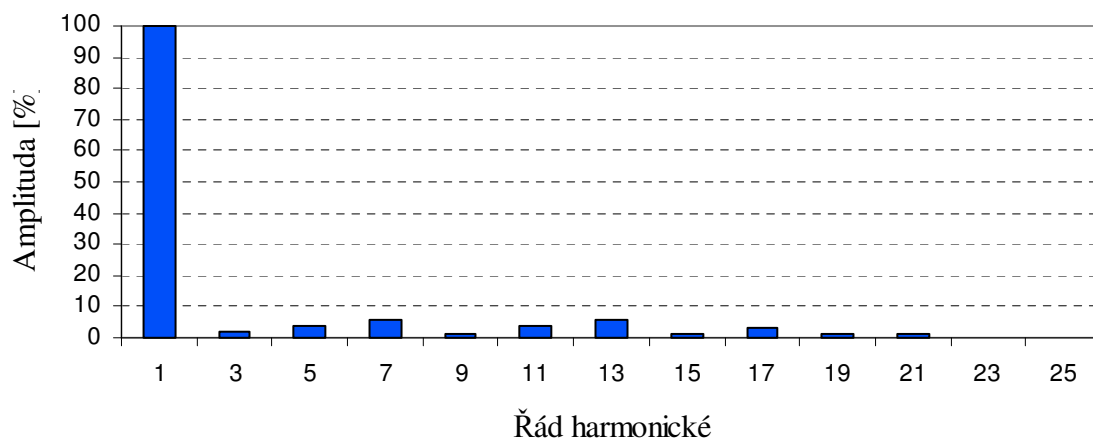
Pokud hovoříme o opatřeních proti vyšším harmonickým, lze obecně mluvit o dvou způsobech, aktivním a pasivním. Do kategorie pasivních opatření lze zařadit pasivní filtry s vyššími harmonickými, dvanácti a osmnácti pulzní usměrňovače a také absorpční obvody. Jako nový prvek se

^[1] Paraf. – Ing. Viktor Hašpl

používají také aktivní filtrační systémy, které pomocí měření aktuálních veličin sítě – napětí, proud přepočítává aktivní filtr doplňky k aktuálním vyšším harmonickým. Poté záměrně spojí aktuální proudové zdroje tak, že součet všech proudů dá opět sinusový průběh proudu. Takovýto filtr je však poměrně značně finančně náročný a vyžaduje rychlé spojení s měřícím čidlem aby mohl užitečně pracovat s harmonickými. Naopak má velmi výrazně nižší ztrátový výkon v porovnání s pasivními filtry.^[9]



Obrázek 12 - Spektrum odebíraného proudu - nefiltrovaná zátěž

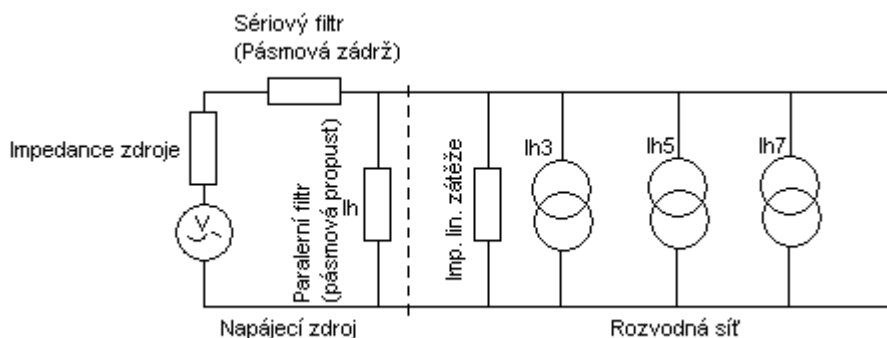


Obrázek 13 - Spektrum harmonických po aplikaci aktivního filtru

Obrázek 15 znázorňuje spektrum odebíraného proudu částečně zatíženým regulovaným pohonem. Jak se situace změní po aplikaci aktivního filtru je vidno na obrázku 16. Můžeme vidět že se výrazně snížila hodnota THD také lze předpokládat snížení efektivní hodnoty proudu cca o 30%. Účelem pasivního filtru je zajistit cestu s nízkou impedancí pro proudy harmonických, které by se jinak uzavírali kdekoli v energetické síti, což je pro nás nežádoucí. Konkrétně se jedná o paralelní

^[9] Paraf. – Novotný J.

filtr. Jak už jeho název naznačuje tento filtr se řadí paralelně ke spotřebiči. Takovýto filtr uzavírá harmonické proudy přes laděné obvody. Tyto obvody mohou být sestaveny pro konkrétní harmonickou popř. jako širokopásmové pro celé spektrum. U sériového filtru se jedná o jiný princip funkce, kdy sériové filtry jsou navrženy tak aby blokovaly harmonické proudy. Tyto filtry se standardně řadí do série se zátěží.^[9]



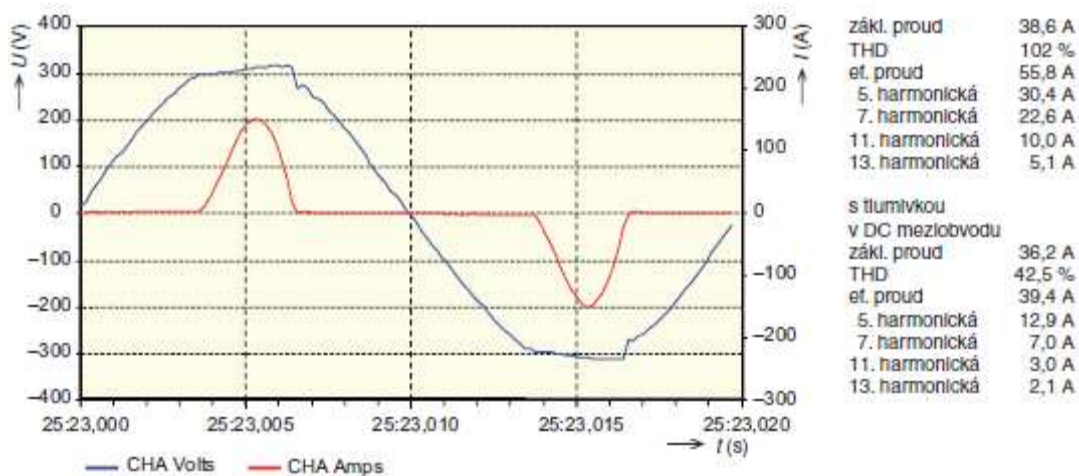
Obrázek 14 - Kombinace paralelního a sériového filtru

3.4.3 Možnosti snižování harmonických

Uvažujeme-li, že síť má společný napájecí bod PCC (point of common coupling), tak právě v tomto bodě impedance ovlivňuje síťové zkreslení. Lze tedy říci, že čím je impedance v PCC nižší, tím je síť stabilnější a o to budou mít na ni menší vliv harmonické proudy. Toho dosahujeme v praxi změnou výkonu u transformátoru. Dá se říci, že použitím transformátoru s dvojnásobným výkonem lze THD napětí v PCC snížit takřka o polovinu. Jednou z nejjednodušších možností jak snížit harmonické proudy je užitím indukčností. Lze vložit třífázovou střídavou tlumivku před měnič frekvence nebo jako stejnosměrnou tlumivku do stejnosměrného meziobvodu. Výhodou stejnosměrné tlumivky je, že dosahuje vyšší účinnosti při stejných hodnotách indukčnosti než tlumivka střídavá. Je lehčí a menší.^[1]

^[9] Paraf. – Novotný J.

^[1] Ing. Viktor Hašpl



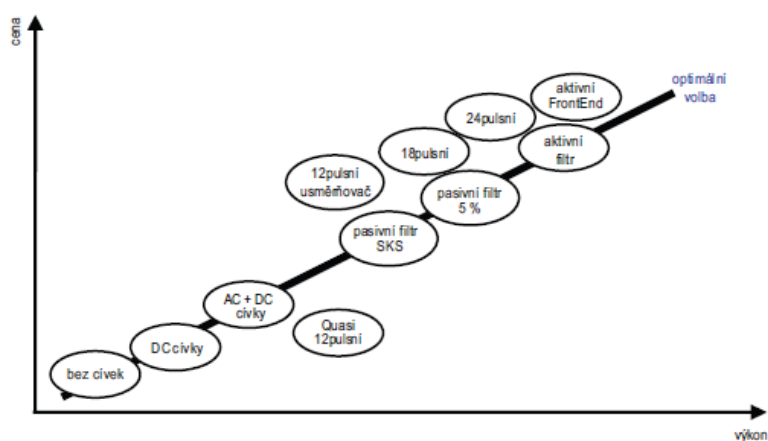
Obrázek 15 - Odběr usměrňovače B2

Užitím indukčností lze dosáhnout těchto hodnot činitelů THDI

- bez indukčnosti -80%
- 4% AC indukčnosti 37%
- 4% DC indukčnosti 31%

Další alternativou, kterou často užíváme pro snížení harmonických proudů je užití pasivních filtrů. Jejich velkou výhodou je velké snížení harmonických při relativně nízkých nákladech. Mají vyšší účinnost než filtry čistě indukční. Proto je lze použít individuálně pro jednotlivé přístroje. Dosahují hodnot THD v rozsahu 5-10%. Lze je použít i pro několik měničů.^[1]

Následující graf ukazuje poměr ceny a výkonu u různých druhů řešení pro snížení harmonických proudů.



Obrázek 16 - Poměr ceny k výkonu jednotlivých řešení pro snížení harmonických proudů

^[1] Paraf. - Ing Viktor Hašpl

3.4.3.1 Frekvenční propusti, neboli filtry

Jejich princip spočívá, že při stanovené frekvenci představují velmi nízký vnitřní odpor a tím pro danou frekvenci v podstatě zkrat. Dalo by se říci, že „odsávají“ harmonické dané frekvence ze sítě. Jejich možností lze přeměnit energii v tepelný výkon. Jejich použití však vyžaduje velmi přesné znalosti poměrů v síti, proto je používáme výhradně pro speciální účely, jako jsou například ochrana kompenzační stanice.^[1]



Obrázek 17 - Filtry harmonických v TNS Svitavy

3.5 Elektromagnetická kompatibilita vůči napájecí soustavě

V následující kapitole 3.5 jsem parafrázoval z práce Karla Hlavy [11].

Při řešení problematiky EMC u obou trakčních soustav používaných v ČR je potřeba přistupovat ke každé zvlášť. Pokud uvažujeme stejnosměrnou soustavu 3kV lze říci, že u této soustavy nevznikly doposud žádné problémy spojené s EMC a ČD žádné ani neočekávají. Vstupní filtr pulzního měniče zajistí, že proud odebíraný hnacím vozidlem bude mít zanedbatelnou střídavou složku. Trakční usměrňovač TNS pak bude v proudu odebíraném ze sítě 22 kV vykazovat obvyklé hodnoty počínaje 11. a 13. harmonickou.

^[1] Paraf. – Ing. Viktor Hašpl

Oproti tomu na jednofázové soustavě 25 kV, 50 Hz vykazují v dnešní době provozovaná trakční vozidla úplné spektrum proudových harmonických lichých řádů počínaje řádem třetím. Z měření bylo zjištěno že harmonické dosahují asi těchto hodnot.

- 3. harmonická (150 Hz) má hodnotu cca 25 % základní harmonické 50 Hz,
- 5. harmonická (250 Hz) má hodnotu cca 10 % základní harmonické 50 Hz,
- 7. harmonická (350 Hz) má hodnotu cca 5 % základní harmonické 50 Hz.

Důsledkem vzniku uvedených harmonických složek v proudu odebíraném hnacím vozidlem "diodového" charakteru je:

- deformace časového průběhu napětí v trolejovém vedení
- nutnost použít v trakčních napájecích stanicích (TNS) filtračně-kompenzační zařízení (FKZ), které by podstatně omezilo průnik uvedených harmonických složek přes trakční transformátor TNS do sítě 110 kV, kde by došlo ke zkreslení napětí této sítě, což by bylo ze strany dodavatele elektrické energie nepřijatelné.

3.6 Nesymetrie při napájení jednofázových drah

Jako symetrické elektrické spotřebiče z hlediska nesymetrie se jeví generátory, vedení i transformátory. Proto lze usoudit, že nesymetrii způsobují především jednofázové spotřebiče.

Pokud provozujeme soustavu kde je více fází je velkou nutností udržovat takovou soustavu v symetrickém stavu, a to hlavně proto, že nesymetrie neblaze ovlivňuje chod spotřebičů připojených na tuto síť. Zvyšují se ztráty a tím i tepelné namáhání vodičů, které vede k rychlejšímu stárnutí elektroizolace a celkovému stárnutí elektrických spotřebičů. Dalším důvodem k odstranění nesymetrie je nepříznivý vliv na stroje energetické soustavy vytvářející magnetické pole, a to zvláště rotační.

Nesymetrii rozlišujeme na dva druhy:

- Amplitudovou
- Úhlovou

Je-li velikost napětí popř. proudů v každé fázi jiná mluvíme o nesymetrii amplitudové, pokud však jsou různé úhly mezi fázory jednotlivých napětí nebo i proudů lze mluvit o nesymetrii úhlové. V praxi se pak setkáváme s oběmi zmiňovanými nesymetriemi současně. Při součtu fázorů u jednotlivých fází lze pak říci, že soustava může být vyvážená – součet fázorů je roven nule, nebo nevyvážená – součet fázorů je různý od nuly. Nesymetrie je v celé soustavě stejná a je způsobena především jako důsledek připojení jednofázových trakčních odběrů. Je poté obsažena v celé soustavě

(výroba, rozvodný systém, ostatní odběratelé). Bezprostředním následkem připojení jednofázové zátěže na třífázovou síť je vznik proudové a napětové nesymetrie.

Jako výsledek proudové nesymetrie je vznik vyrovnávacích proudů, které se nejčastěji objevují v tlumícím vinutí synchronních generátorů. Zhorší se využití těchto generátorů. Způsobuje také ztráty v transformátorech a vedeních. Napětová nesymetrie je pak tvořena nesymetrií proudovou spolu s impedancemi přenosové cesty.

Napětová nesymetrie zmenšuje zatížitelnost skoro všech zařízení, asi nejvíce jsou jí ovlivněny asynchronní motory. U běžných hodnot skluzu asynchronního motoru je zpětná impedance podstatně menší než impedance sousledná a dosahuje velikosti asi 15-35% impedance sousledné. Pokud mluvíme o napětové nesymetrii o velikosti 2%, tak pak tato nesymetrie způsobí v motoru nesymetrii proudovou, a to o velikosti až 5-13%. Motor je poté nadměrně zahříván a dochází k předčasnému stárnutí a znehodnocení elektroizolace i celkovému stavu motoru. Napětová nesymetrie 4% způsobuje zkrácení životnosti asynchronního motoru na polovinu.

Při normálním provozu vyrábějí generátory souměrné napětí, ale proudy závisí na charakteru odběrů. Největším vlivem pak jsou velké jednofázové spotřebiče jako jsou velké indukční pece nebo právě jednofázové trakční odběry. Při poruchovém stavu – nesouměrný zkrat, jsou právě tyto spotřebiče zdrojem proudové nesymetrie. Napětová nesymetrie je největší v místě připojení jednofázového spotřebiče a klesá směrem ke zdroji, který považujeme za souměrný. Proudová nesymetrie má stejnou velikost podél celého vedení.

Kapitolu 3.6 jsem parafrázoval z materiálů Iva Děrgela [4] který se touto problematikou zabýval.

4. Měření

Název: Měření na TNS Svitavy

Datum měření: 2-4.3 2011

4.1 Popis měřené trati:

Pro napájení trakčního vedení na trati Brno - Česká Třebová na které probíhalo měření jsou vybudovány tři napájecí stanice a dvě spínací stanice. TT blansko, TT Svitavy, TMR Opatov, jednofázová spínací stanice Maloměřice, jednofázová spínací stanice Letovice. Na rozhraní obou trakcí ve Svitavách nebylo možné získat územní rozhodnutí pro výstavbu kombinované napájecí stanice. Důvodem byly zejména obavy z ohrožení vysokotlakého a středotlakého rozvodu plynu v městské aglomeraci působením zpětných proudů stejnosměrné trakce. Proto bylo přijato takové atypické řešení, že stejnosměrná část původně navrhované stanice byla vysunuta do Opatova, kde již ohrožení plynovodů nebylo považováno za kritické. Ponecháním transformace 110/22kV ve společné rozvodně ČD 110kV TT Svitavy a řešením napájení TMR Opatov kabelovým vedením 22kV. Trakční transformovny a spínací stanice určené pro napájení úseku trati Brno – Svitavy jsou ústředně řízeny z elektrodispečinku Českých drah Brno. Vývody kabelů 22kV pro TMR Opatov na TT Svitavy a celá TMR Opatov jsou ústředně řízeny a ovládány z elektrodispečinku v České Třebové.^[13]

4.2 Popis TNS:

TNS Svitavy se nachází na trati Brno- Česká Třebová. Na trakční transformovně Svitavy je z důvodu rozměrů a ekologických použit zapouzdřený rozvaděč na jmenovité napětí 123kV užívající pro vnitřní izolaci izolačního plynu SF₆ nebo-li hexafluorid síry. Výrobce je firma ABB. Jedná se o rozvodnu typu H, kde je dvouřadý systém s jedním podélným dělením přípojníc a se čtyřmi vypínači pracujícími také s plynem SF₆. Přívod do trakční napájecí stanice z hladiny 110kV je proveden pomocí průchodek SF₆ – Vzduch.^[13]

^[13] Jan Matějka



Obrázek 18 - Pohled na přívod do TNS 110kV

Dále v blízkosti průchodek, vně objektu jsou nainstalovány svodiče přepětí. Použité transformátory jsou olejové a na straně vysokého napětí připojeny pomocí zapouzďených vodičů. Zapouzďený rozvaděč je umístěn v prvním patře TNS a v přízemí je umístěna rozvodna pro hladinu 27kV obsahující kabelové vývody pro trakční vedení.^[13]



Obrázek 19 - Zapouzďený rozvaděč TT Svitavy

^[13] Jan Matějka

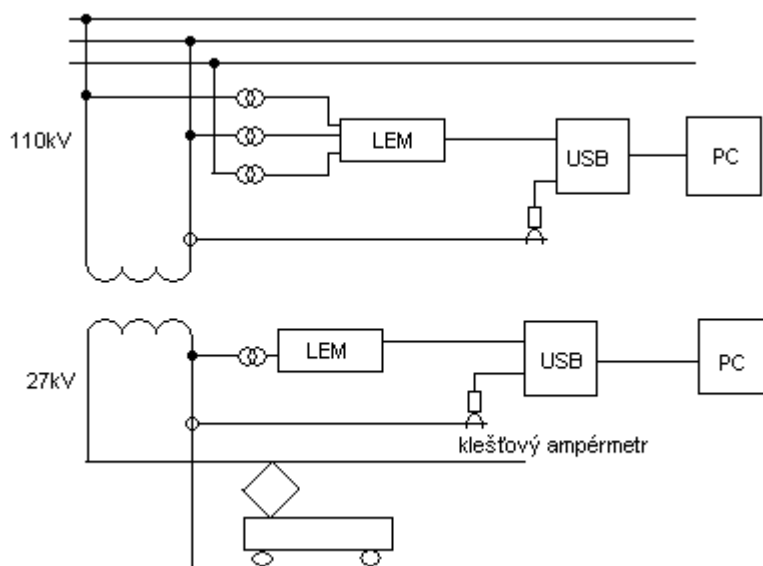
Pro napájecí stanici Svitavy je použito jednoho jednofázového trakčního transformátoru od výrobce Škoda ETD Plzeň s.r.o., s výkonem 10/12,5MVA s převodem $110 \pm 8 \times 2\% / 27\text{kV}$, 50Hz, 113/463A. Stanoviště pro transformátor je řešeno jako kryté. Nádoba transformátoru je zvonové konstrukce. Magnetický obvod je řešen jako dvoujádrový z TR plechů válcovaných za studena. Vinutí je zde použito hliníkové z plochých navzájem izolovaných vodičů. Pro chlazení je použita radiátorová baterie do výkonu 10MVA a s ofukováním nad 10MVA. Odbočky jsou provedeny s přepínačem pod zatížením. Řízení regulace je ovládáno dálkově z dozorny. Transformátor snese i 200 zkratů proti zemi. Rozvodna 27kV je v provedení jednořadovém vnitřním. Jedná se o kobkovou rozvodnu. Pro napájení trakční měnirny Opatov je v trakční transformovně instalována rozvodna 22kV, která zároveň obsahuje vývod pro transformátor vlastní spotřeby 22/0,4kV, 100kVA. Jako rozváděč je zde použit skříňový typ od firmy ABB-EJF Brno s vakuovými vypínači VD 4 sestavený ze čtyřech skříní.^[13]

4.3 Popis měření:

Měření se provádělo v TNS Svitavy. Jednalo se o měření na hladinách 110 a 27kV. Pomocí klešťových ampérmetrů a připojením vývodů z měřicí karty, se měřili velikosti napětí proudů a výkonů. Také se provádělo měření harmonických proudů. Data se ukládala po dobu 3 dnů do nainstalovaných notebooků. Data byla měřena z MTP a MTN. Jednotlivá data byla sebrána v pětisekundových intervalech. Z těchto dat bylo posléze vyhodnocen činitel THD a napětěová nesymetrie.

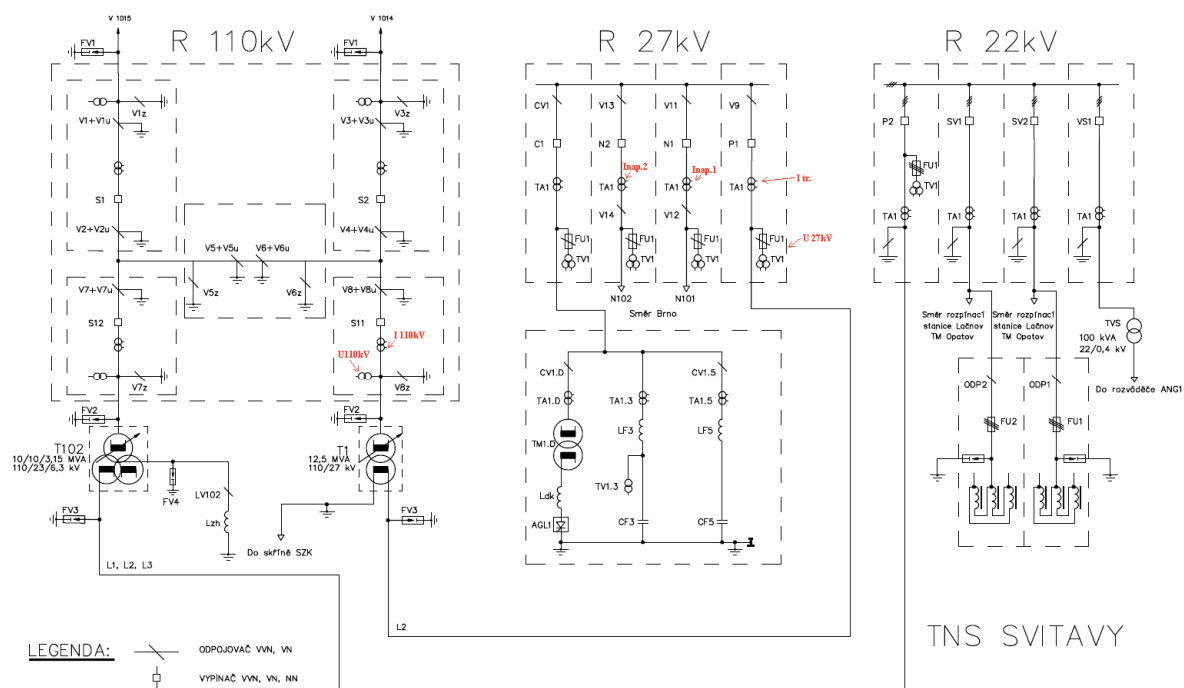
^[13] Jan Matějka

4.4 Schéma zapojení:



Obrázek 20 - Schéma zapojení

4.5 Schéma měření:



Obrázek 21 - Schéma měření

Pro obrázek 21 bylo použito materiálů z TNS Svitavy [12]

4.6 Popis měřících přístrojů:

Jádrem měřicí aparatury je notebook .Použitý měřicí převodník je USB 6210 fy National Instruments se vstupní impedancí 100 GΩ/100pF, s maximální vzorkovací frekvencí 250 kS/s (1 250 000 vzorků za sekundu) při měření na jednom kanále. Při měření na více kanálech se musí tuto hodnota podělit jejich počtem. Celkem má převodník k dispozici 16 měřících kanálů. Rozlišení analogově-digitálního převodníku je 16 bitů, přičemž nejvyšší bit (paritní) představuje znaménko. Vstupní rozsah je možné nastavit na hodnoty ±50 mV až ±10 V. Napětí a proud jsou snímány čidly LEM, resp. klešťovými ampérmetry.^[14]

Přesnost použitých měřících přístrojů a čidel:

- Měřících transformátory MTP i MTN, které jsou instalovány v trakční transformovně mají stejnou třídu přesnosti 0,5.
- Chyba napěťových LEM čidel LV 25 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ±15 V, je 0,8 % (tyto podmínky jsou v TT splněny).
- Chyba proudových LEM čidel LA 25 – NP, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ±15 V, je 0,5 %.
- Chyba proudových LEM čidel LA 55 – P, kterou udává výrobce pro teplotu okolí 25°C a napájecí napětí ±15 V, je 0,65 %.
- Chyba klešťových ampérmetrů E3N od firmy Chauvin Arnoux s šířkou pásma 0 – 100 kHz a rozsahy 10 a 100 A je 3 a 4 %.
- Chyba měřicí karty je pro aplikace „Accuracy Calculator“ uvedena na webových stránkách výrobce pro oba použité rozsahy. Pro rozsah karty ±2,5 V je to ± 4,5680 mV, tj. ± 0,2284 % pro rozsah ±1 V je to ±1,9770 mV, tj. ± 0,1977 %.

Celková chyba při měření střídavého napětí je:

$$\delta_U = 0,5 + 0,8 + 0,23 = 1,53\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu LEM čidlem LA 25 – NP:

$$\delta_{I-LEM} = 0,5 + 0,5 + 0,23 = 1,23\%$$

Celková chyba při měření střídavého proudu klešťovým ampérmetrem:

$$\delta_{I-kleště} = 0,5 + 3 + 0,2 = 3,7\% \text{ [14]}$$

4.5.1 Popis měřícího programu

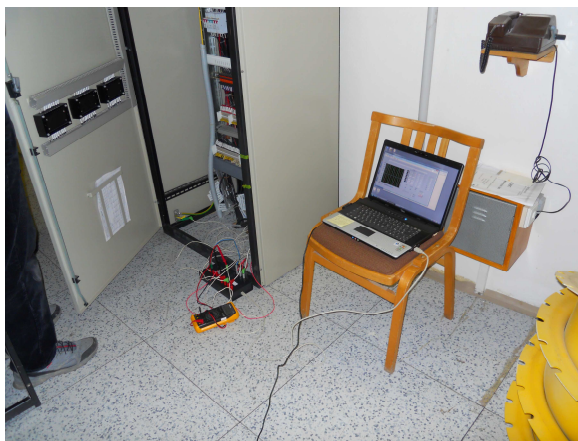
Program pro měření elektrických veličin v trakční transformovně byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW 6.1 od firmy National Instruments. Využívanou programovou aplikací je

^[14] Paleček,J., Kolář,V., Stýskala.V, Tran,K.H., Запуская,Т

^[14] Paleček,J., Kolář,V., Stýskala.V, Tran,K.H., Запуская,Т

kontinuální záznam diagnostikovaných veličin, který umožňuje efektivně volit různé off-line diagnostické metody při postprocessingu naměřených dat.

Na obrázku 22 je vidět Měřicí stanoviště na hladině 110kV . Výstupy z MTP a MTN propojené přes LEM čidla až k měřicí kartě v notebooku.



Obrázek 22 - Měřicí stanoviště 1 110kV

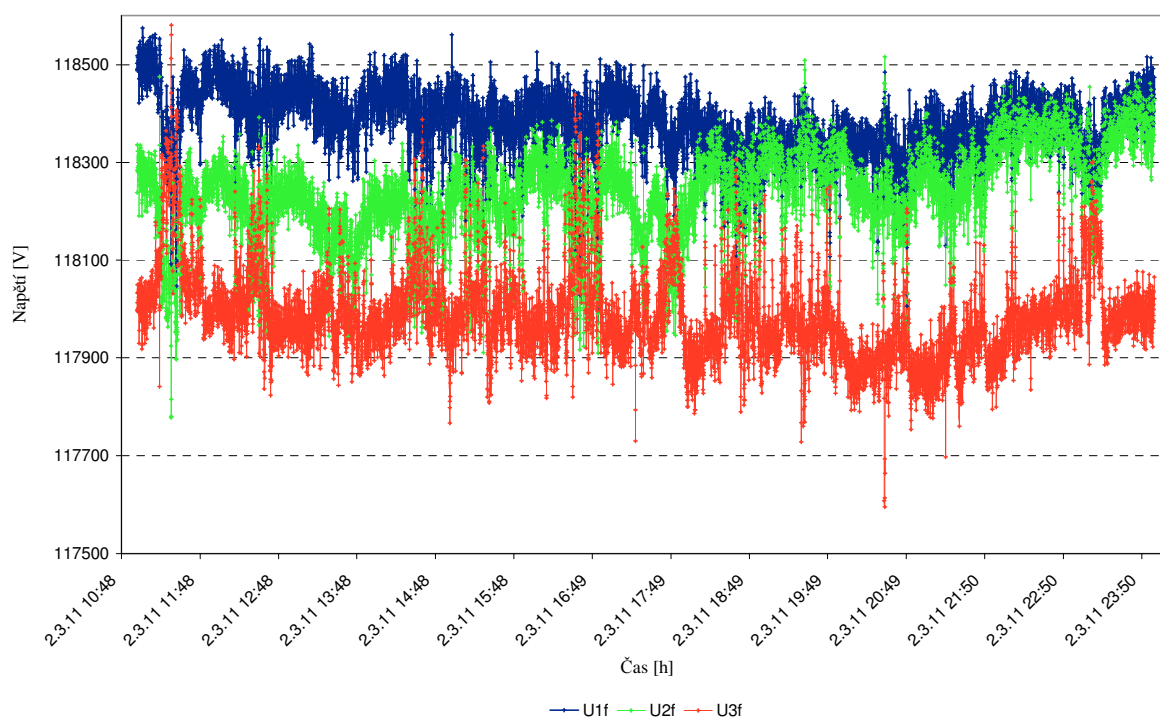


Obrázek 23 - Měřicí stanoviště 2 hladina 27kV

Na obrázku 23 lze vidět měřicí stanoviště č.2 kde měření probíhalo na dvou vývodech pro trakční vedení na hladině 27kV. Zapojení je stejné jako u měřicího místa č.1

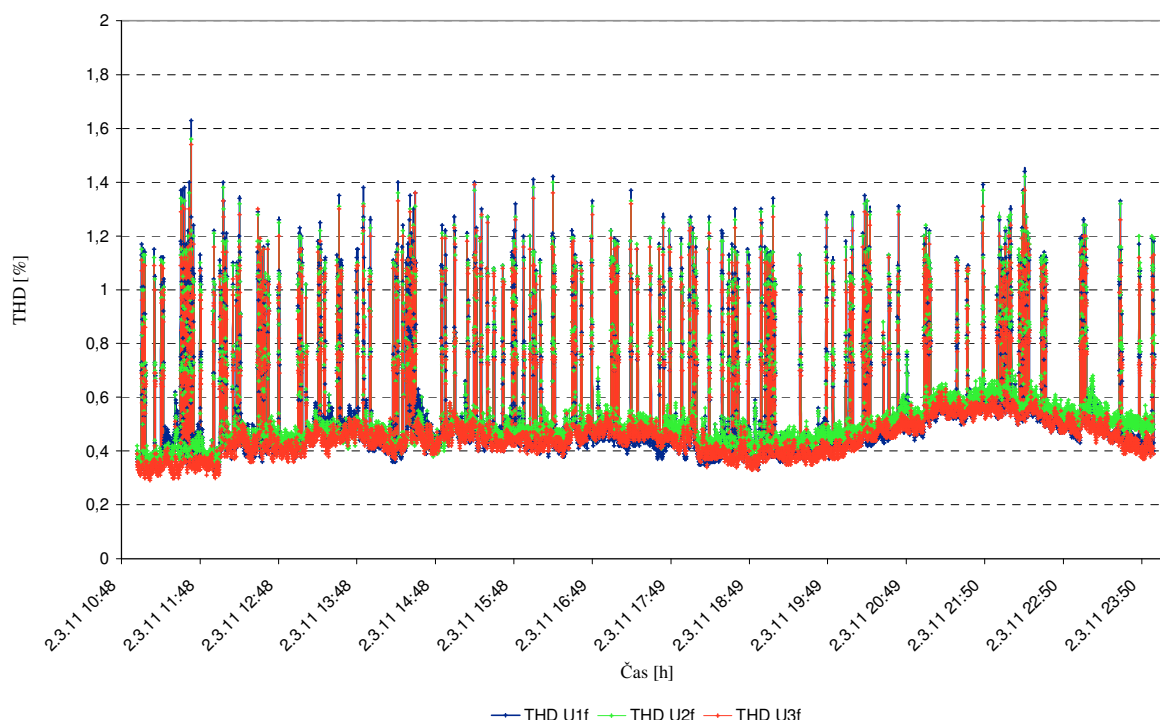
4.6 Grafy ze změřených hodnot

Jednotlivé grafy byly vytvořeny z hodnot změřených přímo v TNS Svitavy. Data byla naimportována do tabulkového editoru Excel a poté graficky vyhodnocena.



Obrázek 24 - Graf průběhu sdruženého napětí na vn straně transformátoru 110/27kV

Na obrázku 24 lze vidět průběhy sdruženého napětí jednotlivých fází transformátoru 110/27kV. Jestliže vycházíme z pravidel provozování distribučních sítí, která nám říkají, že pro hladinu 110kV je dovolená odchylka v napětí $\pm 10\%$ v našem případě to znamená, že by se změřené hodnoty neměly pohybovat pod hranicí 99kV a nad hranicí 121kV. Z grafu lze vidět, že ani jedna hranice nebyla překročena což odpovídá normou daným podmínkám pro napětí a správnému provozu TNS Svitavy co se hladiny napětí týče. Data jsou shromážděna pro datum 2.3. 2011.

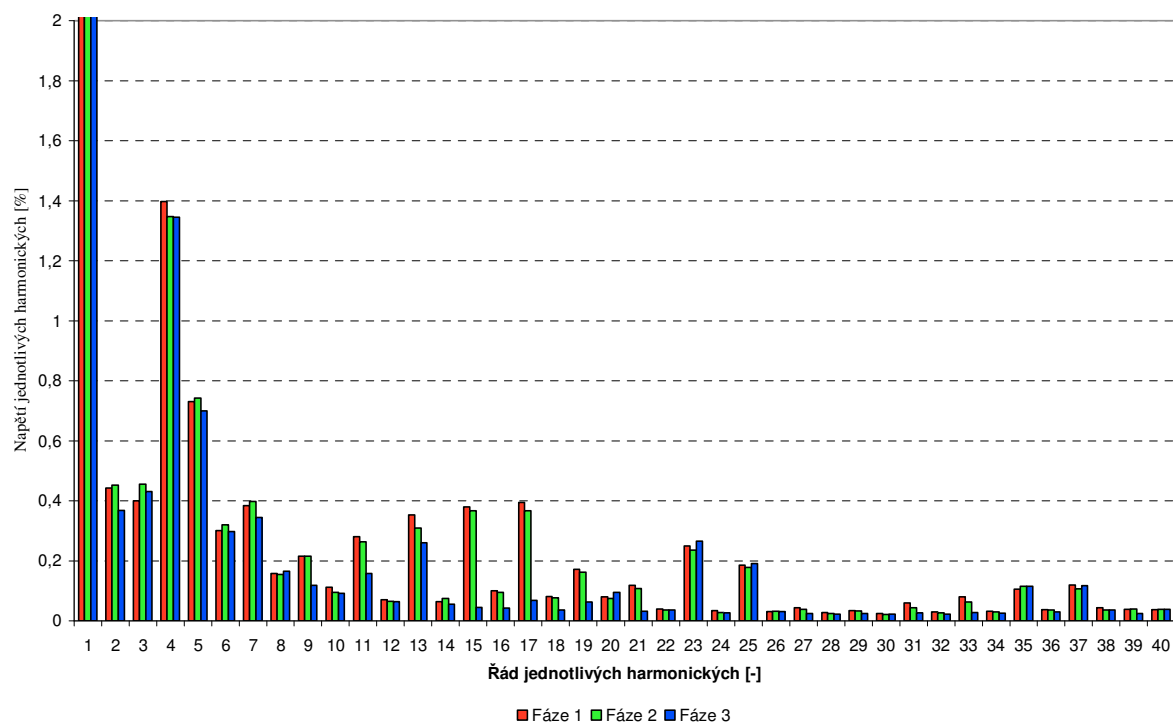


Obrázek 25 - Průběhy THD v dni 2.3.2011

Na obrázku 25 lze vidět průběhy celkových harmonických zkreslení pro jednotlivé fáze. Z grafu si lze všimnout výrazných špiček hodnot jednotlivých zkreslení. Tyto špičky dosahují až k hodnotě 1,6%. A právě tyto špičky THD jsou způsobeny zapojením nelineárního odběru ze sítě. Tyto nelineární odběr jsou nejčastěji způsobeny elektrickými trakčními vozidly, které se v síti projevují jako nelineární spotřebič. Hodnoty pohybující se mezi hodnotami 0,4-0,5% jsou hodnoty sítě naprázdno. Dle topologického hlediska je trať ze železniční stanice Svitavy směrem k železniční stanici Hradec nad Svitavou do kopce, kdy trakční vozidla zapojují trakční motory a přispívají do sítě harmonickými proudy. Železniční trať okolo stanice Svitavy není příliš frekventovaná proto graf není příliš spojitý ale spíše špičkový. Díky tomu však lze poznat kdy na této trati se pohybuje trakční vozidlo, kdy špičkové hodnoty svědčí o přítomnosti vozidla na trati.

Pravidla pro provozování distribučních sítí určují hodnoty THD na $\leq 2,5\%$ pro správný chod. Nejvyšší dosažená hodnota se pohybovala okolo 1,6% což je ještě pod hranicí 2,5%.

Pro ukázkou je zde vybrán den začátku měření tj. 2.3. 2011. Průběhy pro ostatní dny a průběhy po celou dobu měření jsou přiloženy na DVD přiloženém k diplomové práci.



Obrázek 26 - Kontrola jednotlivých harmonických dle PPDS

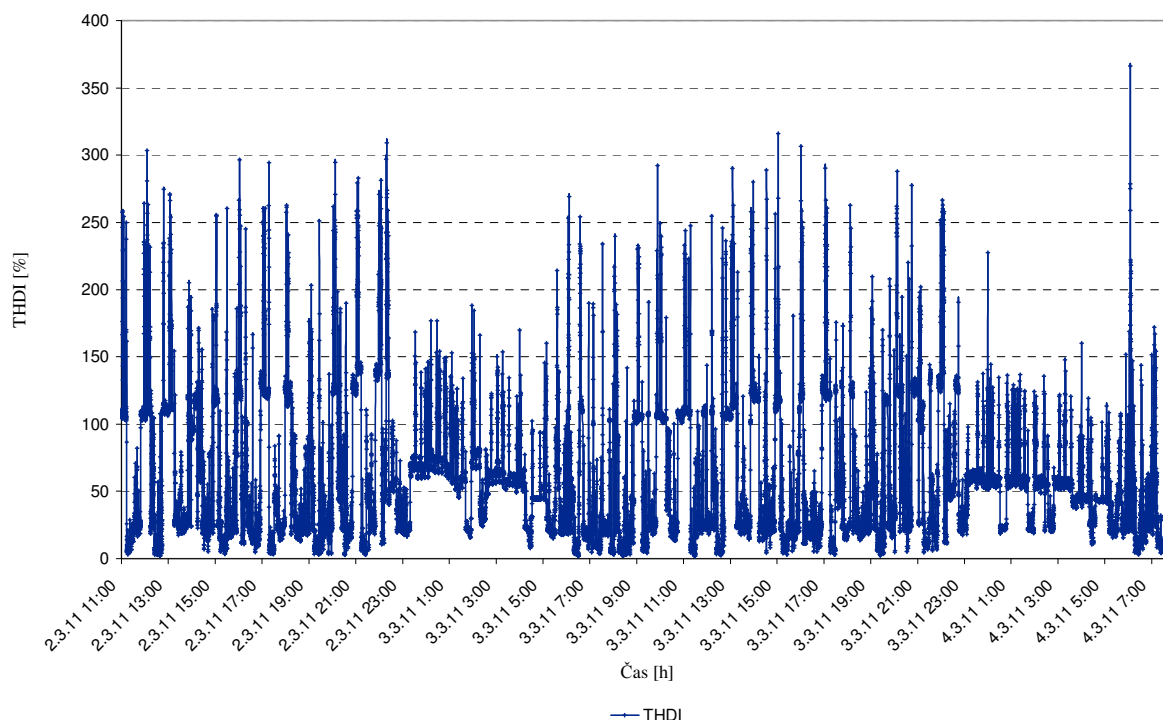
Na obrázku 26 jsou graficky znázorněny maximální hodnoty amplitud jednotlivých harmonických. Podle PPDS jak ukazuje tabulka 3 je maximální hodnota určena na 2% maximální amplitudy. V grafu je znázorněno, že žádná z hodnot do 40 – té harmonické nepřesahuje tuto mezní hodnotu. Výjimku samozřejmě tvoří základní harmonická.

Graf byl sestaven ze změřených hodnot po dobu celého měření tj. 2.3 – 4.3. 2011. Důvodem nižších hodnot 3 a 5 harmonické je umístění filtrů právě pro tyto harmonické v prostorách TNS Svitavy.

Tabulka 3 - Maximální amplitudy dle PPDS^[15]

Síť	Maximální amplituda harmonické u_h [% U_n]	Maximální THD [%]
110kV	2,0	$\leq 2,5$
220kV	1,5	$\leq 2,0$
400kV	1,0	$\leq 1,5$

^[15] FG forest



Obrázek 27 – Činitel THDI po dobu celého měření

Na obrázku 27 je vidět průběh harmonického proudového zkreslení (THDI) po dobu celého měření. Tento graf je znázorněn pro hladinu 110kV kde můžeme vidět, že toto zkreslení dosahuje až k hodnotě 366%. Toto je ovšem špičková hodnota, pokud bychom měli uvážit průměrnou hodnotu z měření, tak ta se pohybuje okolo 58%.

THDI je také podstatným činitelem pro stabilitu sítě a musí vyhovovat podmínce^[16]:

$$THDI_A = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_A} \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot 100 \quad (26)$$

Kde: S_{kV} – Zkratový výkon ve společném napájecím bodě
 S_A – Přípojný výkon zařízení uživatele sítě

^[16] František Rajský



Obrázek 28 - Ukázka podmínky pro THDI

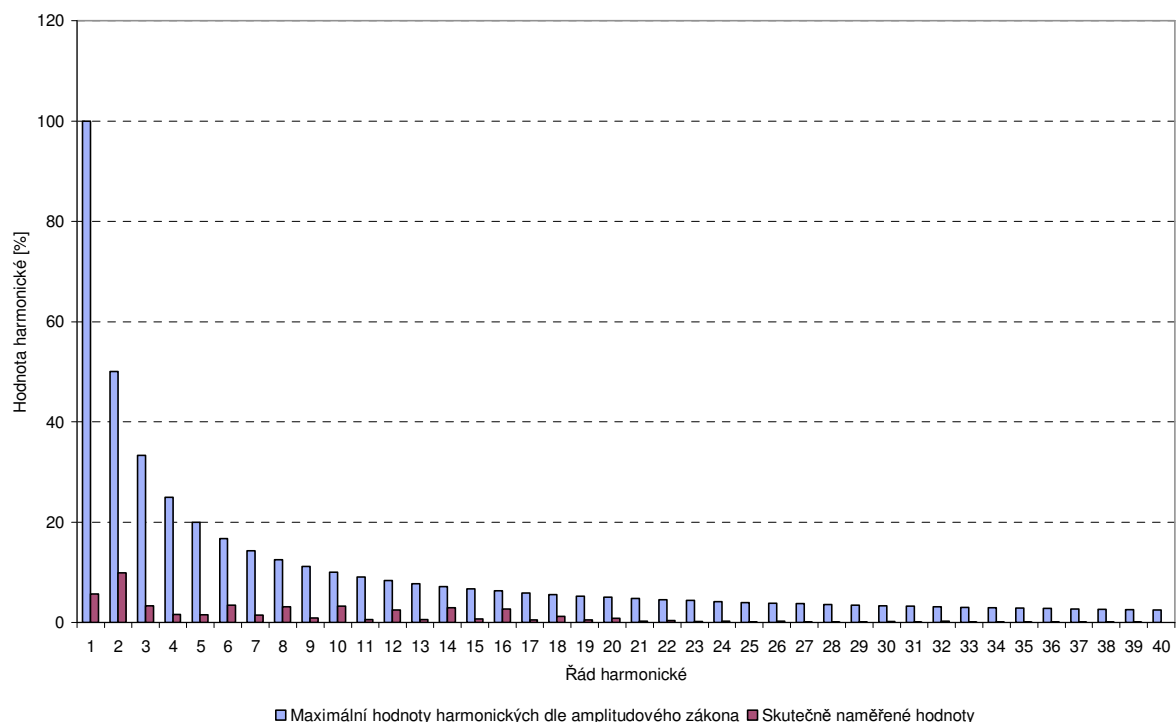
Kromě omezení proudů jednotlivých harmonických musí být rovněž omezena i hodnota pro celkový činitel harmonického zkreslení Tedi proudu zařízení uživatele sítě. Ta musí vyhovovat podmínce^[16]:

$$THDi_A = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_A} \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot 100 \quad (27)$$

Kde: S_{kV} je zkratový výkon sítě v společném napájecím bodě
 S_A je přípojný výkon zařízení uživatele sítě

Z obrázku 31 je patrné že činitel THDi je hluboko v pod mezí stanovenou podmínkou. Pro graf bylo použito hodnot vytvořených z půlhodinových průměrů z ohledu na přehlednost.

^[16] František Rajský



Obrázek 29 - Srovnání maximálních hodnot harmonických proudu dle amplitudového zákona a skutečně naměřených hodnot

Na obrázku 29 můžeme vidět porovnání maximálních hodnot daných amplitudovým zákonem se skutečně změřenými hodnotami. Hodnoty vybrané pro tento graf jsou maximální hodnoty kterých se dosáhlo v průběhu celého měření.

Amplitudový zákon^[16] definuje poměrné hodnoty jednotlivých proudových harmonických I_h vůči základní složce I_1 , kde h je řád harmonické složky

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (27)$$

Tj. tento výraz udává největší možné hodnoty jednotlivých spektrálních složek v ustáleném stavu. Tyto hodnoty však nemohou vznikat u reálného spotřebiče. Tento zákon je založen na pravoúhlém časovém průběhu proudu to však v praxi možné, kdy je průběh zaoblen vlivem rozptylové reaktance transformátoru a napájecí sítě. Z grafu 29 vyplývá, že žádná ze složek nepřesahuje teoretickou maximální hodnotu.

Pro srovnání jsem ještě přidal pro porovnání tabulku ve které je srovnáno měření s teoretickými hodnotami. V prvním řádku je udán řád harmonické záměrně jsme vybrali tyto řády kdy 11, 13, 23, 25 generují dvanáctipulzní usměrňovače používané především u českých drah (trakce) a 5,7 (MHD). V druhém řádku jsou změřené hodnoty z TNS Svitavy. Třetí řádek obsahuje tytéž hodnoty

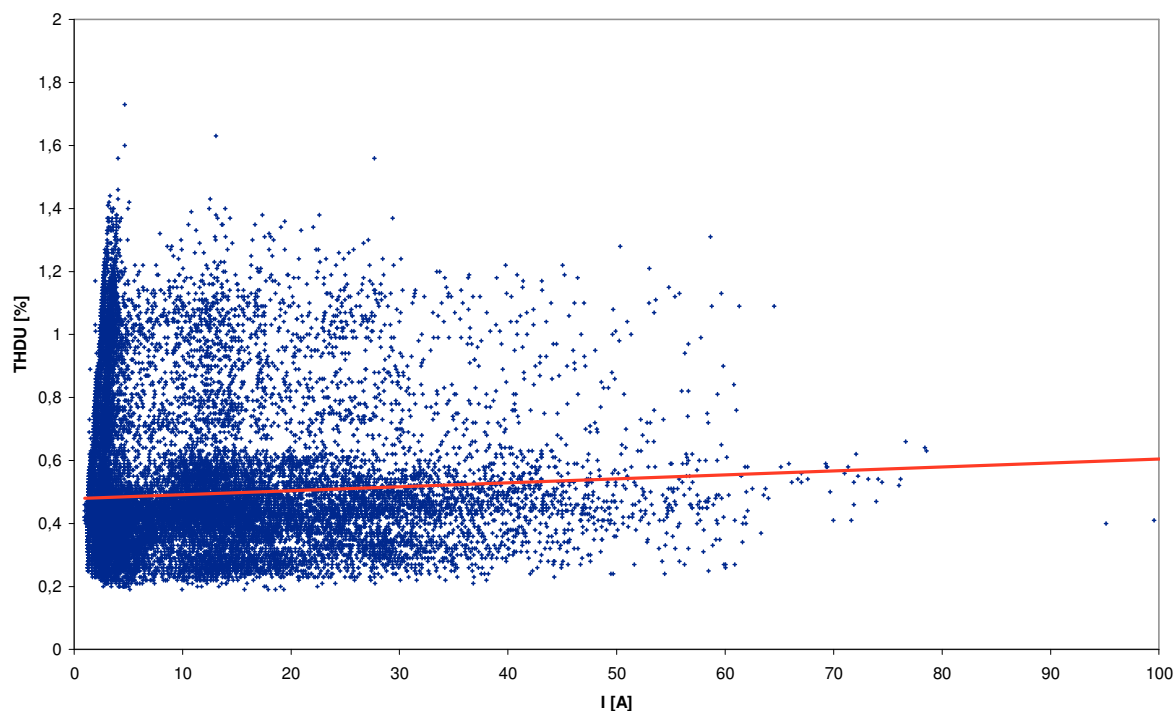
^[16] František Rajský

převedené do %. Hodnoty takřka odpovídají protože největší hodnota 1 harmonické byla 100,14A.. Ve čtvrtém řádku je uvedena teoretická maximální hodnota dle amplitudového zákona. Pátý řádek obsahuje hodnoty dané podnikovou normou PNE 33 3430-0 [09] Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě , část 0 : Výpočetní zhodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav.

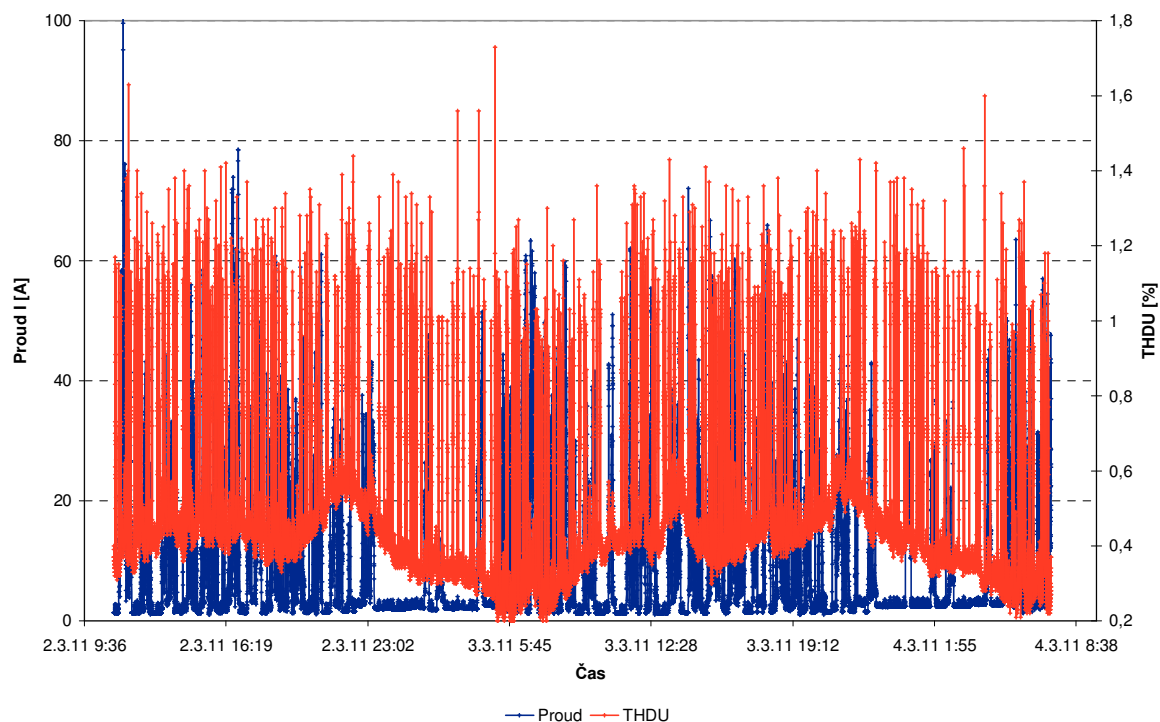
Tabulka 4 - Porovnání hodnot THDI dle jednotlivých kritérií

Řád Harmonické	5	7	11	13	23	25
Změřené harmonické [A]	1,61	3,4	3,27	2,43	0,36	0,26
Změřené harmonické [%]	1,61	3,4	3,27	2,43	0,36	0,26
Harmonické dle amplitudového zákona [%]	20	14,3	9,09	7,69	4,35	4
Harmonické dle PNE 33 3430-0 [09] [%]	4	3	9	6	3	3

Při pohledu na tabulku č.1 lze vidět že nebylo překročeno žádných normovaných hodnot.



Obrázek 30 – Korelace

**Obrázek 31 – Korelace (průběh)**

Na obr. 30 a 31 je provedena korelace závislosti napěťové nesymetrie a odebíraného proudu. Podle korelačního koeficientu, který vyšel 6% lze usoudit, že připojovaná síť je velmi tvrdá. Tj. napěťové harmonické ji s rostoucím proudem nejsou schopny příliš ovlivnit. Jedná se ovšem o velmi malé proudy řádově max. stovky ampér.

Tabulka 5 - Korelační koeficient

	<i>thd U_{f1}</i> (%)	<i>I</i> (A)
<i>thd U_{f1}</i> (%)	1	
<i>I</i> (A)	0,058496	1

Závěr:

Ve své diplomové práci sem se snažil osvětlit problém spolupráce trakční a distribuční napájecí soustavy. Spolupráce těchto sítí je provázena dvěma problémy. Nesymetrií a pronikáním vyšších harmonických do energetické sítě. Zaměřil jsem se především na problém spojený s harmonickými, které jsou generovány především nesymetrickými přístroji, měniči frekvence a velkými jednofázovými odběry. Osvětleny a rozvedeny jsou jak nežádoucí důsledky tak i možnosti jejich snižování.

Pokud pokrok v technologii nevyvine lepší trakční motory, budeme se muset problémem generace harmonických trakčními vozidly zabývat. Současné řešení problémů je možno provést pomocí pasivních filtrů, které by měli zajistit cestu s nízkou impedancí pro proudy harmonických, které by se jinak uzavírali kdekoliv v energetické síti. Další možností na technologicky vyšší úrovni je pak použití aktivních filtrů, která sebou přinášejí i větší finanční náklady. Obě metody ovšem dostatečně zajišťují ochranu před nežádoucími harmonickými. Otázky provozování sítí nelze brát na lehkou váhu. S rozrůstající se rozvodnou sítí a požadavky na odběry elektrické energie je velká nutnost se věnovat otázce právě harmonických, pokud nebudou řádně kompenzovány mohou způsobit velké problémy provozovateli distribučních sítí.

Druhá část diplomové práce je věnována vyhodnocení dat z trakční napájecí stanice ve Svitavách. Měření probíhalo ve dnech 2-4.3 2011. Data byla poté zpracována a vyhodnocena v programu Excel. Cílem měření bylo ověřit zda měřené veličiny harmonických nepřevyšují meze stanovené normami rozbor a analýza změřených harmonických a jejich vliv na napájecí síť. Vycházel jsem hlavně z normy ČSN EN 50 160 a pravidel provozování distribučních sítí. Pravidla pro provozování distribučních sítí určují hodnoty THD na $\leq 2,5\%$ pro správný chod. Nejvyšší dosažená hodnota se pohybovala okolo 1,6% což je ještě pod hranicí 2,5% a ze to považovat za dobrý stav. Porovnány byly i hodnoty jednotlivých vyšších harmonických které také nepřesahovali stanovené normované hodnoty. Důvodem byly filtry pro vyšší harmonické instalované přímo v TNS Svitavy. Byl proveden korelační výpočet z hodnot proudu a THD s výsledkem 5,8 % z čehož lze usoudit, že tyto funkce se příliš neovlivňují a to z důvodu velké tvrdosti sítě v místě připojení. Pozornost byla nejvíce věnována 11, 13, 23, 25 harmonickým, které generují dvanáctipulzní usměrňovače používané především u českých drah.

Jelikož TNS Svitavy je poměrně nově postavená napájecí stanice s moderním vybavením zapouzdřeným rozvaděčem a je provozována jako bezobslužná nebude v budoucí době potřeba jakéhokoliv zásahu. Jediný problém by mohl způsobit větší zatížení jednofázovými odběry, které by mohli zvýšit celkový poměr harmonických v síti.

Použitá literatura

- [1] *Elektro: Harmonické napětí v síti? Nežádoucí!* [serial online]. Ing. Viktor Hašpl: FCC publis s.r.o. (Danfoss, s.r.o.), 2007. [cit. 6.5 2011] Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_dokument=34683>
- [2] Jiří Krupica. Vědeckotechnický sborník ČD č. 21/2006. *Zpětný vliv trakčních měničů na Českých drah vůči napájecí síti 22 kV, 50 Hz* [online]. Praha, červen 2006; [cit. 6.5 2011], URL: <http://cdrail.cz/VTS/vts21.html>
- [3] Doc. Ing. Jiří Danzer CSc., *Elektrická trakce I*, Plzeň 2000, ISBN : 80-7082-633-9
- [4] Děrgel, I. *Vliv elektrizovaných drah na napájecí soustavu*. Ostrava 2010. 51s. Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a informatiky VSB-TUO. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Josef Paleček, CSc.
- [5] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Praha : Český normalizační institut, 2000. 17s
- [6] TES , *Kritéria kvality energie* [online] 2008, [cit. 6.5 2011]. URL: <http://www.tesnet.cz/cs/dwn/kvlaita.pdf>
- [7] TOPINFO, *Moje energi – Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě* [online], 2011, [cit. 6.5 2011], URL: <<http://www.mojeenergie.cz/cz/csn-en-50160>>
- [8] Paleček J. *Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility*, VSB-TUO, Ostrava 2000
- [9] Novotný, J. *Vliv nesinusového primárního napětí na trojfázový můstkový usměrňovač*. Pardubice 2010. 60s. Diplomová práce na fakultě elektrotechniky a informatiky, katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě univerzity Pardubice. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Karel Hlava, CSc.
- [10] Ladislav Mlynařík. Vědeckotechnický sborník ČD č. 29/2010. *Model dvanáctipulzního usměrňovače* [online]. Pardubice, březen 2010; [cit. 6.5 2011], URL: <http://cdrail.cz/VTS/vts29.html>
- [11] Karel Hlava. Vědeckotechnický sborník ČD č. 13/2002. *Trakční napájecí soustava pro vozidla řady 680* [online]. Praha, říjen 2001; [cit. 6.5 2011], URL: <http://cdrail.cz/VTS/vts13.html>
- [12] Materiály TNS Svitavy

- [13] Jan Matějka. Vědeckotechnický sborník ČD č. 8/1999. *Nová technika při elektrizaci trati Brno - Česká Třebová* [online]. Praha, červenec 1999; [cit. 6.5 2011], URL: <http://cdrail.cz/VTS/vts08.html>
- [14] Paleček, J., Kolář, V., Stýskala, V., Tran, K.H., Запущая, Т.: *An analysis of the influence of electrified traction on power network, measuring unbalance*. MET2009, Department of Electrical Engineering in Transport – Faculty of Electrical and Control Engineering – Gdańsk University of Technology. Gdańsk, Polsko, 24.-26.9.2009. Sborník str.39-42. ISBN 83-908116-2-6
- [15] FG Forrest – Creative technologies, www.fg.cz, fg@fg.cz, 1996-2006, *Parametry elektřiny* [online] 2008, [cit. 6.5 2011]. URL: <<http://www.eon.cz/cs/info/parameters.shtml>>
- [16] František Rajský. Vědeckotechnický sborník ČD č. 29/2010. *Porovnání výsledků simulace a experimentálního měření harmonických frekvencí* [online]. Praha, březen 2010; [cit. 6.5 2011], URL: <http://cdrail.cz/VTS/vts29.html>